



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

VLIV SPODNÍHO PŘEDEHŘEVU PŘI OPRAVÁCH OSAZENÝCH DPS

INFLUENCE OF BOTTOM PREHEATING IN REWORK OF ASSEMBLED PCB

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Čechák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Ondřej Čechák

ID: 173630

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Vliv spodního přehřevu při opravách osazených DPS

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku přehřevu osazených desek s plošnými spoji při demontáži/montáži součástek.

Teoreticky zpracujte vlivy materiálu, tepelné kapacity DPS a součástek na homogenitu teploty na povrchu DPS.

Prakticky proměřte stávající úroveň přehřevu na doporučeném přípravku a analyzujte současný stav. Pro zlepšení stávajícího vybavení vyberte vhodný přehřev z dostupných na trhu (pracovní plocha 150 mm x 200 mm, přenos tepla radiací nebo nucenou konvekcí, regulace do 350 °C), ev. modifikujte stávající.

Na dodaném přípravku realizujte spodní lokální ohřev max. velikosti 35 x 35 mm s regulací teploty a ověřte toto přídatné řešení pro opravy DPS s velkou zástavbovou hustotou.

Prakticky odzkoušejte a následně doporučte vhodnou technologickou variantu, která zlepší současný stav.

Zpracujte a diskutujte dosažené výsledky.

Spolupráce s firmou SANMINA SCI

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 8.6.2017

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce seznamuje s problematikou fyzikálních mechanismů přenosu tepla a souvisejících matematických vztahů a využití této problematiky v technologii spodního předehřevu při opravě desek plošných spojů. Vysvětluje důležitost a důvody použití této technologie, nejen v profesionální produkci. Zaměřuje se na odborný rozbor přístrojů na základě jejich vlastností a objasňuje rozdíly v základních typech těchto zařízení. Důraz je poté kladen na praktické ověření technických parametrů předehřevných přístrojů a na návrh a praktickém ozkoušení experimentálního zařízení lokálního spodního ohřevu desky plošných spojů.

KLÍČOVÁ SLOVA

spodní předehřev, oprava, deska plošných spojů, teplo, přenos tepla

ABSTRACT

This bachelor's thesis introduces the problematics of physical mechanisms of heat transfer and the correlative mathematical formulas and the use of mentioned problematics in the technology of bottom preheating in the rework of assembled printed circuit boards. It explains the importance and reasons of use of this technology, not merely in the professional production. It focuses on expert analysis of the appliances based on their properties and clarifies the differences in basic types of the devices. The emphasis is then laid on a practical testing of the technical parameters of the preheating devices as well as on an experimental design and a practical testing of a local bottom printed circuit board preheater.

KEYWORDS

bottom preheater, rework, printed circuit board, heat, heat transfer

ČECHÁK, O. *Vliv spodního přehřevu při opravách osazených DPS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2017. 54 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Vliv spodního předeřevu při opravách osazených DPS jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 8. června 2017

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Ondřeji Chmelovi za odbornou pomoc při zpracování praktické části práce, pracovníkům firmy Sanmina-SCI Czech Republic s.r.o. za poskytnutí měřících přístrojů a pracoviště, firmě SMTPlus.Cz za zapůjčení přístroje, firmě WABAG Brno s.r.o. za technickou pomoc a Johaně Kratochvilové za pomoc s formálním zpracováním bakalářské práce.

V Brně dne: 8. června 2017

.....
(podpis autora)

OBSAH

Úvod	7
Teoretická část	8
1 Teplo	8
1.1 Joulovo teplo.....	9
1.1.1 Materiály pro využití jevu Joulova tepla	9
1.2 Přenos tepla.....	10
1.2.1 Přenos tepla kondukcí.....	11
1.2.2 Přenos tepla konvekcí.....	12
1.2.3 Přenos tepla radiací.....	12
1.3 Tepelné vlastnosti základních plátovaných materiálů	13
1.3.1 Teplotní délková roztažnost ve vztahu k teplotě skelného přechodu	13
2 Spodní předeřev	14
2.1 Faktory ovlivňující homogenitu teploty na DPS	15
2.2 Teplotní profil	15
2.2.1 Teplotní profil na předeřřivacím zařízení	15
2.2.2 Faktory ovlivňující nastavení teploty předeřřevu	16
2.3 Předeřřivací zařízení založené na kondukcii	16
2.4 Předeřřivací zařízení založené na konvekcii	17
2.5 Předeřřivací zařízení založené na radiaci	17
2.6 Srovnání předeřřivacích zařízení.....	18
2.7 Defekty DPS související se spodním předeřřevem	19
Praktická část	20
3 Modifikace spodního předeřřevu	20
3.1 Použité nevyhovující zařízení.....	20
3.1.1 Technické problémy zařízení Metcal PCT-1000.....	21
3.2 Návrh řešení a požadavky firmy Sanmina.....	24
3.2.1 Zařízení WELLER WHP3000.....	25
3.2.2 Zařízení SP863DU.....	26
3.2.3 Zařízení Quick 854 ESD	29
3.2.4 Další navržené přístroje	30
3.2.5 Problémy se zapůjčováním přístrojů	31
3.2.6 Shrnutí navržených zařízení	32
3.2.7 Alternativní řešení	32

4	Lokální spodní ohřev DPS	34
4.1	Návrh topného tělesa	34
4.1.1	Odporový plech	34
4.1.2	Topné těleso s použitím TLV technologie	35
4.1.3	Odporový drát.....	36
4.2	Regulace teploty na zařízení	37
4.2.1	Návrh obvodu PWM.....	37
4.3	Konstrukce	38
4.3.1	Výstupní topná hlavice	38
4.3.2	Kompresor	39
4.4	Testování rychlosti vyhřátí a maximálního výkonu	39
4.5	Testování funkce zařízení v kombinaci se spodním ohřevem	40
4.5.1	Měření 1 a porovnání.....	41
4.5.2	Měření 2 a porovnání.....	42
4.5.3	Praktické ozkoušení pracovníky firmy Sanmina-SCI Czech Republic	
s.r.o.	44	
5	Závěr	45
	Literatura	46
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	48
	Seznam obrázků	49
	Seznam tabulek	50
	Seznam grafů	51
A	Návrh obvodu PWM	52
A.1	Deska plošného spoje - strana top.....	52
A.2	Seznam součástek	52

ÚVOD

Využití přehřevu při opravě desek plošných spojů (DPS) je dnes již fundamentální záležitostí nejen v profesionální produkci, nýbrž i v domácích kutilských podmínkách. S rychlým vývojem elektroniky a technologií v ní použité, ať už jde o pokrok v použitých substrátech, pájkách, či typech pouzder, se nyní jedná o běžný technologický krok opravy.

Cílem opravy DPS je samozřejmě efektivně vyměnit vadnou součástku či součástky, ovšem rovněž nezpůsobit poškození jiné součástky či samotné desky plošných spojů. Toto poškození může vzniknout velmi jednoduše, například teplotním šokem vzniklým na desce při jejím kontaktu s pájedlem. Tyto defekty jsou ve velkém procentu případů fatální a vedou ke zničení celé desky či komponentů.

Použití spodního přehřevu při těchto opravách je tedy důležitým technologickým prvkem, neboť omezuje, či úplně zabraňuje vzniku defektů spojených s teplem díky zvýšení teploty na desce, a tedy zabraňuje teplotnímu šoku způsobeného kontaktem s pracovním nástrojem.

Tato práce se zabývá teorií tepla a jeho přenosu a spojením zmíněného fyzikálního jevu s tématem spodního přehřevu, kde budou srovnány nejčastěji průmyslově používané přehřívací technologie. Praktická část se věnuje řešení problému zadaného firmou Sanmina-SCI Czech Republic s.r.o. a realizaci experimentálního lokálního spodního ohřevu pro desky plošných spojů.

TEORETICKÁ ČÁST

1 TEPLO

Teplo je ve své podstatě energie, která se šíří mezi dvěma zkoumanými systémy bez použití práce, chemické práce a přesunu hmoty a je důsledkem teplotního rozdílu mezi nimi. Označuje se fyzikální značkou Q a jako jednotka se používá joule, J.

Pokud se teplota dvou systémů liší, začne proudit energie - teplo, z teplejšího systému do chladnějšího, tedy začne probíhat tepelná výměna. Když vybraný systém zvýší svou teplotu v závislosti na systému druhém, teplo pohltí a je bráno kladně, opačně pak teplo vyzáří a je záporné. Pokud se přesně neurčí směr přenosu energie, označujeme ho jako teplo vyměněné mezi systémy [1].

Teplo souvisí se změnou vnitřní energie systému. Systém, jenž vydává více tepla, má vyšší teplotu. Jev, při kterém se v závislosti na teplotě mění objem systému, se nazývá teplotní objemová roztažnost a popisuje jej vztah

$$\Delta V = V_0 \cdot \alpha_V \cdot \Delta T ; [m^3; K^{-1}; K], \quad (1.1)$$

kde ΔV značí změnu objemu při změně teploty ΔT , V_0 je počáteční objem systému při počáteční teplotě T_0 a α_V je koeficient teplotní délkové roztažnosti, jenž se definuje jako derivace převrácené hodnoty počátečního objemu systému podle teploty,

$$\alpha_V = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{dV}{dT} ; [K^{-1}; m^3; K], \quad (1.2)$$

jehož jednotkou je reciproký kelvin, K^{-1} . Výjimkami jsou rovnovážné polohy při zahřívání většiny materiálů dále od sebe a materiál se rozpíná. Právě rozdílné hodnoty koeficientu teplotní objemové roztažnosti materiálů v soustavách, jež jsou vystavené měnícím se teplotním podmínkám, či jen jednoho materiálu s nehomogenním rozložením teplot vede k poruchám jako je deformace, či naopak praskání předmětu.

Určením velikosti tepla, jenž zvýší teplotu zkoumaného systému o jednotku, zjistíme hodnotu, jež se nazývá tepelná kapacita, značí se C a užívá jednotku joule na kelvin, $J \cdot K^{-1}$. Pro vztáhnutí měrné kapacity na konkrétní materiál, ji musíme přizpůsobit na jednotku hmotnosti, takto přizpůsobená veličina se nazývá měrná tepelná kapacita, značí se c a používá jednotku joule ku kelvinu a kilogramu, $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$. Množství přijatého tepla Q systémem o hmotnosti m a měrné tepelné kapacitě c se definuje

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T ; [J; kg; J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}; K], \quad (1.3)$$

kde ΔT značí změnu teploty systému.

Při izolaci dvou systémů a předpokladu, že nedojde k přeměně energie, lze teoreticky určit teplotu, na níž se dva systémy ustálí. Tento teoretický způsob určení ustálené teploty se nazývá kalorimetrickou rovnicí[2] a definuje se

$$T = \frac{c_1 \cdot m_1 \cdot T_1 + c_2 \cdot m_2 \cdot T_2}{c_1 \cdot m_1 + c_2 \cdot m_2} ; [K; J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}; kg; K], \quad (1.4)$$

kde T_1 je počáteční teplotou prvního systému, c_1 je měrnou tepelnou kapacitou prvního systému, m_1 je hmotnost prvního systému, T_2 je počáteční teplotou druhého systému, c_2 je měrnou tepelnou kapacitou druhého systému, m_2 je hmotnost druhého systému a T je konečnou teplotou po ustálení.

1.1 Joulovo teplo

Joulovo teplo, rovněž známé jako ohmické či rezistivní teplo, je jev, při kterém vodič, kterým prochází proud, uvolňuje teplo. Tento jev má původ v chování mikroskopických částic, z nichž je vodič složen. Elektrony putující obvodem jsou urychlovány elektrickým polem a při průchodu vodičem kolidují s ionty materiálu vodiče, čímž se část jejich kinetické energie přemění na teplo[3]. Z toho vyplývá, že čím vyšší je odpor vodiče, tím větší množství tepla vydá, přičemž polovodičové materiály teplo naopak s průchozím proudem z okolí přijímají. Na rozdíl od termoelektrického jevu není ohřev joulovým teplem vratný proces a definuje se

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t ; [J; \Omega; A; s] , \quad (1.5)$$

kde Q je teplo, jež vyzáří vodič s elektrickým odporem R pod proudem I za dobu t . Pokud není odpor vodiče znám, může být podle Ohmova zákona rovnice upravena na podobu

$$Q = U \cdot I \cdot t ; [J; V; A; s], \quad (1.6)$$

přičemž U je napětí mezi konci vodiče.

Konstanta, jež určuje závislost odporu materiálu na teplotě, se nazývá teplotním součinitelem odporu, jeho jednotkou je reciprokový kelvin a definuje se

$$\alpha_R = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \Delta T} ; [K^{-1}; \Omega; \Omega; K], \quad (1.7)$$

kde ΔR značí změnu odporu při změně teploty ΔT a R_0 označuje počáteční odpor materiálu. Důležité je také znaménko hodnoty součinitele, pokud je kladné, odpor se zvyšující se teplotou stoupá a naopak.

1.1.1 Materiály pro využití jevu Joulova tepla

Obecně se jev Joulova tepla objevuje jako parazitní jev u všech elektrických zařízení a minimalizuje se chladiči. Cíleně se však využívá v elektrických topných člancích, a tedy v zařízeních produkujících teplo.

Při volbě materiálu k tvorbě takového topného článku, je nutno zvolit takový, jenž odpovídá následujícím požadavkům:

- dostatečně vysoká rezistivita,
- nízká tepelná roztažnost,
- vysoká tepelná vodivost,
- nízký kladný teplotní součinitel odporu [4].

Obecně můžeme pak topné články rozdělit podle použitého materiálu na:

- kovové články (např. manganin, nichrom, kanthal),
- keramické články (např. MoSi_2 , PTC keramika),
- polymerní články (např. vodivá guma),
- kombinované články (např. filmy vytvořené tlustovrstvou (TLV) technologií.

Topný článek (těleso) se volí nejčastěji podle rozsahu teplot v jakém má zařízení pracovat, ovšem i podle rozměrů a tvaru média, v němž je článek umístěn. Kovové články jsou tvořeny slitinami kovů a podle typu slitiny pokrývají velmi široké rozmezí teplot. Jejich nevýhodou je nutná elektrická izolace a chránění článku před korozi. Konkrétně v případě chromniklu (slitina $\text{Ni}_{80}\text{Cr}_{20}$) toto není nutné, neboť při prvním průchodu proudem se sám pokryje vrstvou oxidu, jež slouží jako korozní ochrana.

Keramické články jsou tvořené z vodivé keramiky a jsou určené pro vysokoteplotní aplikace. Rovněž se realizuje PTC (Positive Thermal Coefficient - kladný teplotní součinitel odporu, viz kapitola 1.1) keramika, jež je schopna fungovat jako svůj vlastní termostat, neboť při vyšších teplotách přestane vést proud.

Polymerní články jsou tvořené z vodivých polymerů. Jejich výhodou je nízká korozivita a velká ohebnost. Nevýhodou pak nízký rozsah pracovních teplot.

Kombinované články jsou zpravidla realizované TLV technologií na vhodném nosiči, na nějž se nanese odporová vrstva. Články nabízejí velmi kvalitní tepelnou vodivost a široký rozsah pracovních teplot. Nevýhodou může být vysoká cena článku.

V zařízeních, kde je důležité ohřívat plošně a předpokládá se štíhlý profil média, je vhodné použití TLV článků nebo velmi tenkých plechů z kovových materiálů jako je manganin (slitina $\text{Cu}_{86}\text{Mn}_{12}\text{Ni}_2$) nebo kanthal (slitina FeCrAl s variací poměru na základě typu kanthalu).

1.2 Přenos tepla

Šíření tepla mezi dvěma systémy je uskutečněno celkem třemi mechanismy, a to vedením, neboli kondukcí, prouděním, neboli konvekcí a sáláním (někdy také zářením) neboli radiací. K určení rychlosti q_t , s jakou systém mění svou teplotu, je používán vztah

$$q_t = \frac{T - T_0}{t} ; [^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}; \text{K}; \text{K}; \text{s}], \quad (1.8)$$

kde T_0 značí počáteční teplotu, T teplotu konečnou a t dobu pozorování. Tento vztah se nazývá teplotní gradient. Míra, jakou se teplo šíří systémem, je dána rozdílem teploty na jeho horkém konci T_H a teploty na jeho studeném konci T_S ku šířce systému d , tedy

$$q_d = \frac{T_H - T_S}{d} ; [^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}; \text{K}; \text{K}; \text{m}]. \quad (1.9)$$

Tento podíl se nazývá teplotní spád, značí se q_d a jeho jednotkou je stupeň celsia na metr, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$. [1]

1.2.1 Přenos tepla kondukcí

Vedení tepla, neboli kondukce, je typ přenosu tepla, vznikající mikroskopickými srážkami hmoty ve zkoumaném tělese. Srážkami si mikroskopické částice předávají energii, rozkmitávají se na vyšší amplitudy a tímto způsobem se teplo šíří celým předmětem.

Pro určení množství tepla Q , jež projde plochou předmětu za určitou dobu t , je používán vztah

$$Q = k \cdot S \cdot \frac{T_H - T_S}{d} \cdot t ; [J; W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}; K; K; m; s] , \quad (1.10)$$

kde S je plochou předmětu, podíl $((T_H - T_S)/d)$ značí teplotní spád, t je zkoumaná doba a k je součinitelem teplotní vodivosti, jenž je charakteristický pro daný materiál, přičemž kvalitně tepelně vodivý materiál má vysokou hodnotu k . Rovněž se zavádí veličina tepelný odpor, značí se R_T a je definován

$$R_T = \frac{d}{k} ; [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}; m; W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] , \quad (1.11)$$

díky čemuž je možné zavést vztah

$$Q = S \cdot \frac{T_H - T_S}{R_T} \cdot t ; [J; m^2; K; K; m^2 \cdot K \cdot W^{-1}; s] , \quad (1.12)$$

jenž umožní určit množství tepla, procházejícího plochou za určitý čas, s definovaným tepelným odporem desky. Při rozhraní dvou ploch se používá vztah

$$Q = S \cdot \frac{T_H - T_S}{\frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2}} \cdot t , \quad (1.13)$$

kde je šířka prvního předmětu d_1 , součinitel tepelné vodivosti prvního předmětu k_1 , šířka druhého předmětu d_2 a součinitel tepelné vodivosti druhého předmětu k_2 . Při zkombinování rovnic 1.11 a 1.13 vznikne vztah

$$Q = S \cdot \frac{T_H - T_S}{\Sigma R_T} \cdot t , \quad (1.14)$$

jenž se použije na výpočet množství tepla Q , procházejícího předmětem o vrstvách se stejnou plochou příčného průřezu S a součtu jejich jednotlivých tepelných odporů ΣR .

Schopnost homogenního systému vyrovnávat teploty při neustálém vedení tepla označujeme jako teplotní vodivost a je definována vztahem

$$a = \frac{k}{c \cdot \rho} ; [m^2 \cdot s; W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}; J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}; kg \cdot m^{-3}] , \quad (1.15)$$

přičemž k značí součinitele tepelné vodivosti materiálu, c měrnou tepelnou kapacitu materiálu, ρ hustotu při určité vlhkosti a značí součinitele teplotní vodivosti materiálu, o jednotce metr čtvereční za sekundu, $m^2 \cdot s^{-1}$. Čím je hodnota součinitele teplotní vodivosti nižší, tím je teplota ve specifickém místě materiálu výrazněji závislá na změně

povrchové teploty. [5]

1.2.2 Přenos tepla konvekcí

Proudění je mechanismus šíření tepla, jenž je možno sledovat pouze v tekutinách, tedy kapalinách a plynech. Princip konvekce je v ohřívání molekul tekutiny, jež se ve většině případů rozpíná, čímž zmenší svou hustotu. Tato ohřátá tekutina putuje směrem vzhůru, čímž uvolní místo pro ohřátí chladnější části kapaliny a tento proces dále pokračuje. Vzhledem k tomu, že kapalina po ohřátí vztlakem stoupá vzhůru, nejedná se tak jen o významný jev šíření tepla, ale také o jev pohybu hmoty.

Ve srovnání s kondukcí může být zahřívání tělesa konvekcí rychlejším procesem, neboť dochází k více kolizím částic, a tedy ke většímu předání energie. [1]

1.2.3 Přenos tepla radiací

Dalším typem přenosu tepla je radiace, záření či sálání pomocí elektromagnetických vln. V případě, kdy teplo přenáší právě elektromagnetickými vlnami, hovoří se o něm jako o tepelném záření, neboť by mohlo být velmi jednoduše zaměněno s elektromagnetickými signály. Elektromagnetické záření je nejdůležitější z pohledu existence života na Zemi, neboť ji právě tepelným zářením zahřívá Slunce.

Pro přenos tepla zářením není potřeba žádného hmotného prostředí. Na rozdíl od kondukce a konvekce se tak díky tomuto faktu může teplo, pomocí radiace, šířit i ve vakuu. Zároveň každá hmota s teplotou vyšší než absolutní nula emituje tepelné záření. Je to dáno faktem, že částice hmoty kmitají pod určitou frekvencí, jedná se tedy o vlnění o jakési vlnové délce. Toto vlnění se dokáže šířit prostorem a předat energii hmotě, do které narazí. Nejvíce tepla pak vyzáří teoretický model zvaný černé těleso, jenž vše dopadající záření pohltí a zároveň vyzáří největší možné množství tepla. [1]

Množství vyzářeného tepla je dáno především třemi faktory, a to

- teplotou tělesa,
- barvou povrchu tělesa,
- plochou povrchu tělesa.

Výkon P_r předmětu, jenž vyzařuje teplo (dále zářiče), je dán Stefanovým-Boltzmanovým zákonem

$$P_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot T^4 ; [W; W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}; -; m^2; K], \quad (1.16)$$

kde $\sigma = 5.6703 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ se označuje Stefanova-Boltzmanova konstanta, ε je emisivita zářiče pohybující se od 0 do 1 (odpovídající černému tělesu), S plochou povrchu zářiče a T teplotou zářiče. Výkon P_a , s jakým předmět přijme teplo formou záření ze zářiče o teplotě T_0 je

$$P_a = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot T_0^4 ; [W; W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}; -; m^2; K], \quad (1.17)$$

při stejném popisu veličin. Předmět o teplotě T vyzařuje teplo, ovšem zároveň ho přijímá. Celkový výkon dodaný radiací P_Σ je tedy

$$P_\Sigma = P_a - P_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot (T_0^4 - T^4) ; [W; W; W]. \quad (1.18)$$

1.3 Tepelné vlastnosti základních plátovaných materiálů

Základní plátované materiály DPS jsou kompozitními materiály, jejichž vlastnosti závisí na konkrétním typu materiálu. Pro správné tepelné zacházení s určitým materiálem je nutné znát jeho tepelné vlastnosti. Důležité tepelné vlastnosti u základních plátovaných materiálů jsou především [6]:

- teplotní délková roztažnost,
- teplota skelného přechodu,
- odolnost při pájení,
- tepelná vodivost.

1.3.1 Teplotní délková roztažnost ve vztahu k teplotě skelného přechodu

Teplotní délková roztažnost popisuje teplotní změny rozměru předmětu v lineární části teplotní závislosti a je charakteristická pro každý materiál.

Teplota skelného přechodu (značící se T_g) charakterizuje teplotu, při níž dochází k výrazné změně rozměrů v ose Z. Materiál přechází ze sklovitého stavu do stavu plastického a tvárného, což je zpravidla vratným jevem. Překračování teploty skelného přechodu není žádoucí, neboť při ní mohou nastat defekty DPS (např. delaminace DPS, separace Cu plošek, defekty v prokovených otvorech).

2 SPODNÍ PŘEDEHŘEV

Jedná se o zařízení používané v opravách osazených desek plošných spojů, jež je umístěné pod opravovanou deskou a jeho úkolem je co nejhomogenněji předebrát osazenou desku na určitou teplotu. Jeho význam je v zabránění vzniku poruch v důsledku teplotního šoku z následného pájení. Zvýšená teplota opravované desky rovněž urychlí celý proces pájení, neboť teplotní rozdíl pájených spojů a pájedla je mnohem menší, než u DPS s pokojovou teplotou. Teplotní vyrovnanost desky je nesmírně důležitá, neboť spousta desek obsahuje chladiče, jako jsou napájecí a zemní měděné plochy, nebo například konektory, které způsobují vznik míst úniku tepla, takzvané studené zóny. [7]

Homogenost prohřátí desky plošných spojů neovlivňuje pouze tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita materiálu desky a součástek, složitost desky (počet vrstev, nerovnoměrná hustota propojů), ale i teplotní gradient předebrěvu, kdy právě příliš vysoký teplotní gradient vede k velkým teplotním rozdílům na desce, a tedy možným defektům.

Pokud se na osazené DPS vyskytne vadná součástka, řeší se tento defekt výměnou onoho komponentu, přičemž je hlavním cílem opravy dosáhnout výsledku co možná nejvíce se blížícího originálním manufakturním specifikacím produktu. Vzhledem k masivním rozdílům v materiálech použitých pro výrobu jak pouzder součástek, tak jejich kontaktů, pájek a samotných substrátů desek, a to hlavně v tepelné roztažnosti a měrné tepelné kapacitě, není možné použít běžného ručního pájedla k odstranění součásti a připájení nové bez velkého rizika poškození ostatních komponentů a substrátu. [8]

Toto riziko je umocněno použitím bezolovnatých pájek, jelikož jejich teplota tavení (přibližně 217 °C (SAC pájka) až 227 °C (SN100C, SC pájky) je mnohem vyšší než u pájek olovnatých (přibližně 183 °C), a tedy je i zpravidla náročnější na odpájení jak časově, tak mechanicky, což svádí opravujícího technika, aby vyvinul větší tlak na pájedlo, či ho vyhrál na mnohem vyšší teplotu, než je třeba. Obojí může vést k závažným poruchám výsledného produktu, jež jsou velmi často i špatně detekovatelné. Kromě tohoto faktu je nutno poznamenat, že pouzdra některých integrovaných obvodů ručním pájedlem odpájet nelze (například QFN nebo BGA, jež využívají nejčastěji pájení horkým vzduchem) a použití spodního předebrěvu je u nich z principu téměř nutné. [9]

Z výše zmíněného tedy vyplývá, že každé předebrívací zařízení funguje na principu přenosu tepla a jeho mechanismech. Právě použitý typ šíření tepla k předebrěvu je velmi významným určujícím faktorem výběru zařízení pro opravu dané DPS. Nejpoužívanější typy spodních předebrěvů jsou následující:

- kondukční pec,
- kondukční plotna (hotplate),
- infračervené předebrěvy,
- předebrěvy s nucenou konvekcí.

Důležitými parametry předebrívacích zařízení jsou tedy:

- druh mechanismu šíření tepla,
- rozsah nastavitelných teplot,
- přesnost a kolísání nastavené teploty,

- teplotní gradient.

2.1 Faktory ovlivňující homogenitu teploty na DPS

Použití spodního předehřevu má za účel, kromě jiného, dosáhnout homogenní teploty na celé desce plošných spojů. Jak už bylo zmíněno, homogenitu teploty na desce ovlivňují především,

- materiál substrátu (přednostně tepelná kapacita, tepelná a teplotní vodivost),
- počet vrstev DPS,
- složitost, hustota propojů, případně použití rozlévané mědi,
- součástky na DPS (přednostně kovové pouzdra a konektory, fungující jako chladič).

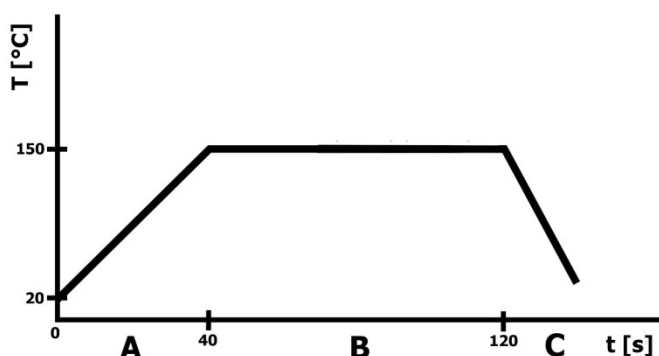
Ohled na tyto faktory je především časový, a to takový, že kvalitně prohřát desku s negativními faktory na homogenitu teploty trvá delší dobu. Studené zóny u chladičů vždy budou chladnější než okolí a je nutné s tímto faktem počítat.

2.2 Teplotní profil

Teplotní profily jsou grafy závislosti teploty na čase během pájení. V pájecích zařízeních, jako jsou podélné pájecí pece či spodní předehřevy desek při opravě, jde o spolehlivý nástroj pro správu a kontrolu informací o tepelném průběhu procesu. Parametry teplotního profilu se zpravidla nastavují přímo na ohřevném zařízení, měří se poté termočláňkovými teploměry, či profilometry. [10]

2.2.1 Teplotní profil na předehřívacím zařízení

Nejdůležitější dva parametry teplotního profilu předehřívacího zařízení jsou teplotní gradient, jenž by neměl přesáhnout $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ (průmyslový standard je $2\text{--}4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$), kvůli hrozbě velmi nerovnoměrného ohřevu součástek a konečná teplota, na níž se ohřev bude udržovat. Tyto dva parametry jsou zpravidla nastavitelné na předehřevu, popřípadě jsou oba, či jeden z nich, pevně nastaveny výrobcem zařízení. Teoretický příklad teplotního profilu na předehřevu pro olovnatou pájku je vidět na obrázku 3.1.



Obr. 2.1 Teoretický příklad teplotního profilu spodního předehřevu měřeného na spodní straně opravované DPS

Na teoretickém průběhu lze vidět zóny pojmenované A, B a C, přičemž v zóně A dojde k postupnému nahřátí desky na požadovanou teplotu (zde 150 °C), z této zóny lze rovněž určit teplotní gradient. Po snadném výpočtu (viz rovnice 1.2.1) je určen teplotní gradient 3.25 °C·s⁻¹. B je zóna samotných prací na desce při konstantní teplotě desky udržované předehřívacím zařízením a C je zóna chladnutí, jež nastane zpravidla po vypnutí ohřevu, případně po zavedení chladicího systému zařízení.

2.2.2 Faktory ovlivňující nastavení teploty předehřevu

Při použití spodního předehřevu při opravě DPS je nutno brát ohled na dodatečné aspekty dané desky a faktů plynoucích z technologie opravy. Tyto faktory zpravidla sníží možnou nastavitelnou teplotu na určité desce.

Nejpodstatnějším faktorem je bezpečnost práce. Technik opravující danou DPS se při vyhřátí desky na teplotu přesahující 100 °C může lehce o opravovaný kus popálit. Dalším příkladem jsou plastové materiály, jejichž teplotní odolnost se pohybuje převážně do 100 °C (např. specifikační polepy), a jejich poškození je v průběhu opravy nežádoucí.

Ačkoliv by se tedy při (například) bezolovnatém pájení slitinou SAC mohlo jevit jako správné nastavit výhřevnou teplotu na zhruba 150 °C až 200 °C, je nutno respektovat tyto parametry a teplotu použít odpovídající nejnižší možné hodnotě.

2.3 Předehřívací zařízení založené na kondukcí

Kondukční předehřevy jsou nejlevnějšími a v dřívějších dobách také nejpoužívanějšími zařízeními pro spodní předehřívání desek plošných spojů při jejich opravách. Zpravidla jde o systém horkého tácu, takzvaný hotplate. Systémy využívají jevu Joulova tepla a samotné nahřívání je realizováno pomocí odporového tepelného prvku.

Hotplate je pravděpodobně nejtradičnější kondukční předehřívací zařízení. Z názvu vyplývá, že se jedná o horkou desku, na níž je opravovaná DPS položena (viz obrázek 2.2). Vedením se poté teplo přenese z hotplatu do desky plošných spojů. Chlazení je umožněno zpravidla přemístěním DPS na externí chladič.



Obr. 2.2 Příklad spodního předehřívacího zařízení - hotplate typu 946B, převzato z [11]

2.4 Předehřívací zařízení založené na konvekci

Konvekční předehřevy jsou v současnosti zřejmě nepoužívanější variantou předehřevných zařízení na trhu. Využívají procesu nucené konvekce, kdy je zařízením produkován proud plynu, jemuž se udává směr a rychlost. Tento mechanismus je jedním z neúčinnějších pokud jde o přenos tepla, jelikož se jím v krátké době dá přenést velké množství energie.

V praxi tak jde o zařízení s topným médiem ohřívajícím vzduch (příp. dusík), jenž je vháněn do spodní strany desky plošných spojů, čímž ji ohřívá (viz obrázek). Konvekční předehřevy jsou hojně využívány hlavně díky velmi krátké době čekání na vyhřátí DPS, což zkracuje dobu oprav a díky rovnoměrnému rozložení tepla, neboť proudění plynu lépe obklopí desku. Většina těchto zařízení má také zabudovaný chladicí systém proudem chladného vzduchu.



Obr. 2.3 Příklad spodního předehřívacího zařízení - konvekční předehřev Zephyrtronics ZT1, převzato z [12]

Používají se rovněž předehřívací konvekční pece, jimiž proudí horký vzduch. V přímém smyslu tedy nejde o spodní předehřev, jelikož se DPS ohřívá jak z dolní, tak z horní strany.

2.5 Předehřívací zařízení založené na radiaci

Zařízení spodního předehřevu založené na radiaci jsou rovněž častým řešením při opravách nebo prototypizaci. Jak již plyne z důležitých faktorů ovlivňující tento přenos tepla (viz kapitola 1.2.3), a také kvůli neohřátí atmosféry mezi DPS a zářičem, nelze efektivně integrovat teplotní regulaci přímo do přístroje a řeší se termočláňkovými sondami, jež se připevní na desku (viz obrázek 2.4). Pro použití takového předehřívacího zařízení se proto musí rozhodnout právě podle parametrů opravované desky, například podle barvy nepájivé masky. Výhodou správně nastaveného předehřevu je pak ale velmi vysoká homogenita teploty na DPS, jelikož záření proniká i do hloubky materiálu a neohřívá ho jen povrchově.

Nevýhodou může být únava očí obsluhy, kvůli záření, jež předehřívací zařízení produkuje, což ale platí hlavně u zařízení, u nichž není odstíněno viditelné spektrum záření (stínění provedeno zpravidla zalitím do keramického materiálu).

Tuto problematiku ovlivňuje vlnová délka záření produkované zářičem zařízení.

Obecně platí, že čím blíže viditelnému spektru produkované záření je, tím horší pro obsluhu dlouhodobá manipulace s přístrojem bude.

Jak již bylo zmíněno, homogenita ohřevu radiačního zařízení je ovlivněna barvami jak součástek (pouzdra), DPS (nepájivá maska), tak barvou pájeného spoje. Při teoretickém použití světlé (např. bílé) nepájivé masky a tmavých pouzder součástek, dá se předem usuzovat, že rozložení teplot na DPS nebude homogenní.



Obr. 2.4 Příklad spodního přehřívacího zařízení - IR přehřev AOYUE 853A++, převzato z [13]

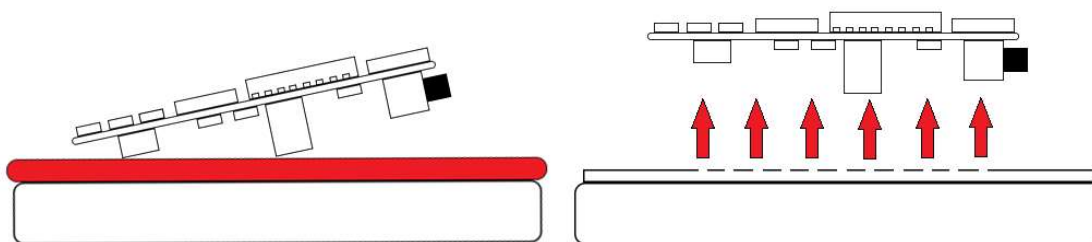
Velmi často se typ přenosu tepla radiací využívá i u pájecích zařízení, takzvaných infrapájek, jež se používají často u velkých čipových pouzder (například BGA, QFN). Velmi ojediněle mají pouzdra těchto čipů jinou barvu než černou, tyto přístroje jsou tedy velmi efektivní.[14]

2.6 Srovnání přehřívacích zařízení

Základní účel spodního přehřevu je homogenně zahřát DPS a součástky na určitou teplotu. Zdánlivě se nabízí srovnat přehřívací zařízení na základě použitých mechanismů přenosu tepla podle například: homogennosti rozložení teploty ohřevu, či rychlosti s jakou je schopno zařízení desku vyhřát. Takovéto srovnání je ale téměř nemožné, neboť výběr nejvíce vhodného zařízení vždy záleží na faktorech DPS, s nímž je operováno. Tyto faktory jsou vždy spojené s materiálovým složením, hmotností DPS, konstrukcí DPS a použitých součástek a jedná se především o:

- teplotní délkovou roztažnost,
- tepelnou vodivost,
- teplotní vodivost a
- teplotu skelného přechodu.

Nevyhovující ohřev osazené DPS může být tedy ve velkém procentu způsoben výběrem špatného přehřívacího systému. Náznorný příklad je uveden na obrázku, kdy je porovnána realizace přehřevu hotplatem a IR, či nucenou konvekcí na desce s nestejnou zástavbovou výškou, díky různé úrovni součástek na spodní straně, což vede k nerovnoměrnému kontaktu s hotplatem, a tedy nehomogennímu ohřevu DPS.



Obr. 2.5 Porovnání homogenosti rozložení ohřevu na DPS u hotplate zařízení a infračerveným či konvekčním zařízením

Naopak však pro DPS s velmi podobnou úrovní součástek, malou chladicí plochou a velmi dobrou teplotní a tepelnou vodivostí, může být stejný kondukční systém naprosto vhodným (např. DPS na keramickém substrátu).

Infračervené předehřevy potřebují vzhledem k mechanismům přenosu tepla radiací měřit teplotu sondou přímo na desce, zpravidla kvůli nastavení výkonu přístroje, tedy množstvím energie, jež se má přenést, na rozdíl od běžného nastavení teplot topného média u kondukčních a konvekčních přístrojů. Velmi často se ale objevuje systém měření teploty na membráně mezi deskou a topným tělesem, což částečně eliminuje použití sond.

Radiaci nicméně ovlivňuje i barva ohřívajícího tělesa a v dnešní době je stále častější použití nepájivých masek různých barev jiných než konvenční zelené. Prakticky by pak bylo zvolení infračerveného předehřevu na světlou DPS (s například bílou nepájivou maskou) nevhodným krokem.

U všech spodních předehřevů je vhodné změřit homogenitu rozložení teploty výhřevu po ploše výstupu, z důvodu správného umístění DPS. Obecně platí, že nejvyšší teplota je ve středu plochy ohřevu, kam bývá situována i opravovaná součást, není to však pravidlem.

Velmi ojedinělý způsob předehřívání je použití konvekční pece. Vzhledem k předehřívání jak z horní, tak dolní strany v uzavřené atmosféře, jde o velmi homogenní ohřev. Nicméně vyžaduje přepravu desky z pece na pracoviště po vyhřátí, což způsobí okamžité chladnutí desky a rovněž vyžaduje speciálních ochranných pomůcek, jako jsou například tepelně izolované rukavice. Díky tomuto faktu je tento způsob předehřevu nejméně vhodný a téměř nepoužívaný.

2.7 Defekty DPS související se spodním předehřevem

Nepřiměřené působení tepla na osazenou DPS může zapříčinit velké množství destruktivních poruch. Poruchy vzniklé s nesprávným použitím či nastavením předehřívacího zařízení souvisí s parametry DPS (viz kapitola 2.5) s níž pracujeme. Poškození teplem vzniká i na součástkách a jde především o praskání keramických kapacitorů, praskání skleněných pouzder diod a efekt popcorningu (rozpínání vlhkosti uvízlé v pouzdrech náchylných na vlhkost a jejich následné praskání). [15]

Mechanismy spojené s teplotním šokem DPS mohou způsobit defekty, jako jsou prohnutí desky (viz kapitola 1.3), delaminace DPS, separace Cu plošek či popálení nepájivé masky.

PRAKTICKÁ ČÁST

3 MODIFIKACE SPODNÍHO PŘEDEHŘEVU

Firma Sanmina-SCI Czech Republic s.r.o. se potýkala s problémem nevyhovujícího přehřívacího zařízení pro pracovníky provádějící opravy DPS. Jedná se o menší stolní zařízení, jež má každý z pracovníků na svém pracovišti a používá jej k výměně menších pouzder, zejména čipové kondenzátory, rezistory a pouzdra typu SO.

3.1 Použité nevyhovující zařízení

Jedná se o programovatelný konvekční spodní přehřívací přístroj od výrobce Metcal s typovým označením PCT-1000 a technickými parametry, viz tabulka 3.1.

Tab. 3.1 Technické parametry konvekčního spodního přehřívacího zařízení Metcal PCT-1000 [16]

Technický parametr	Hodnota
Rozměry (d×š×v):	330 mm × 203 mm × 76 mm
Výkon:	1200 W
Napájecí napětí:	~230 V
Rozsah teplot:	od 25 °C do 400 °C
Rozměr aktivní plochy:	75 mm × 75 mm
Proud vzduchu:	Fixně 538 l/min

Přístroj se hodnotami deklarovanými výrobcem řadí mezi jedny z nejvýkonnějších na trhu, pokud jde o konvekční kompaktní přehřívací jednotky. Přístroj využívá vzduchových trysek, jež ženou vzduch skrz hrubou kovovou síť na desku, jak je možno vidět na obrázku 3.1.



Obr. 3.1 Spodní konvekční přehřev Metcal PCT-1000, převzato z [16]

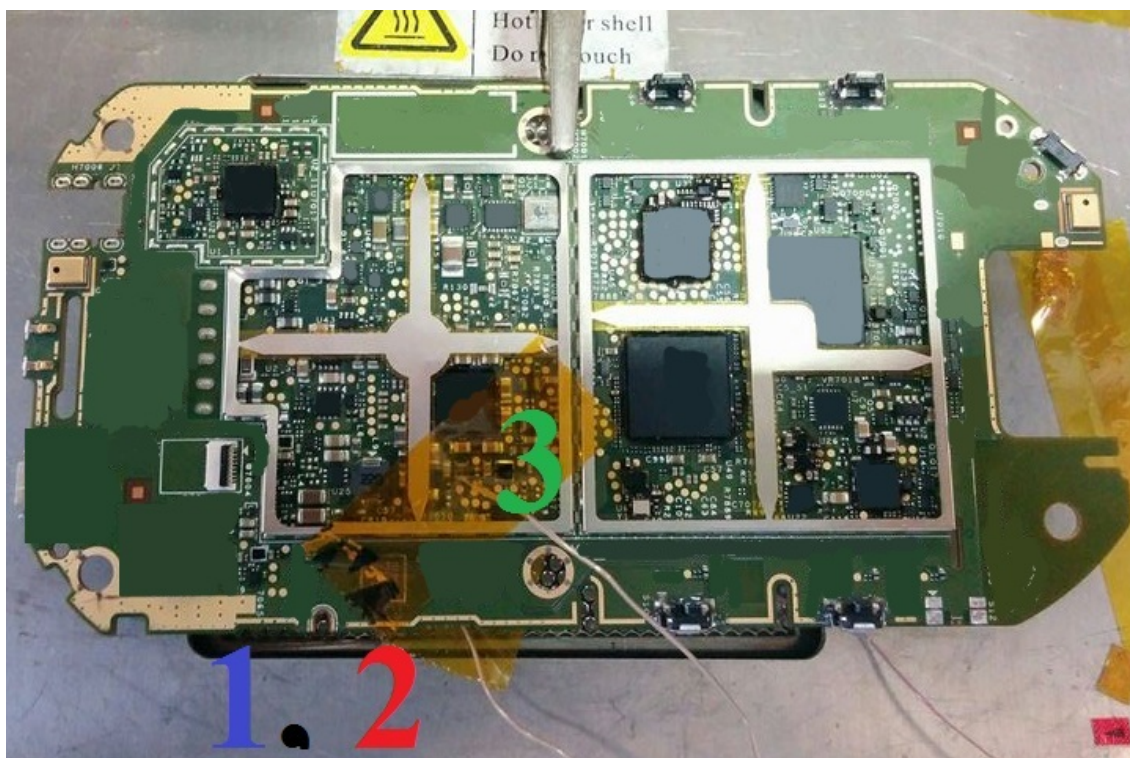
DPS je pak upevněna v pracovním držáku nad médiem. Ohřev tohoto přístroje

vytváří vír, čímž dosahuje soustředění ohřevu a nabízí vnitřní kontrolu teploty na výstupu, nebo vnější kontrolu teploty pomocí termočlánku typu K.

3.1.1 Technické problémy zařízení Metcal PCT-1000

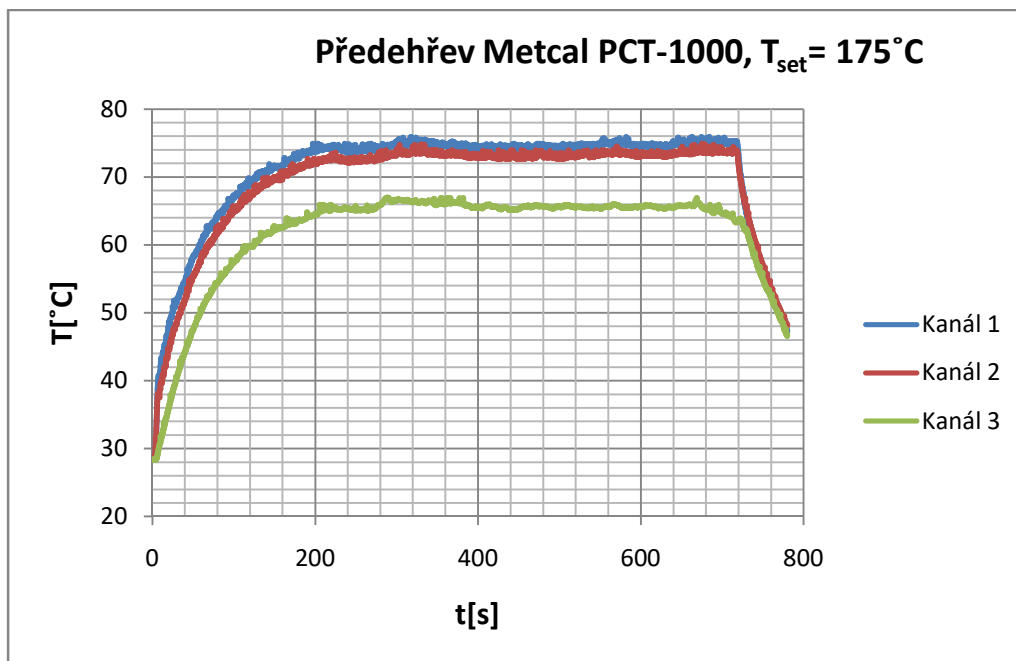
Hlavní oznámený problém přístroje je velký teplotní rozdíl mezi teplotou nastavenou na přístroji (a to jak nastavenou, tak i zpětnovazebnou) a teplotou na mřížce, respektive výstupu horkého vzduchu přístroje, z čehož vyplývá i nižší teplota na spodní straně opravovaného subjektu, než je žádoucí. Pro pracovníky to ovšem neznamená, že zařízení je nepoužitelné, rozdíl teplot ale způsobuje delší čas pro nastavení přístroje pro určitou desku, neboť aby se dosáhlo požadované teploty na spodní straně DPS, je třeba zjistit jak vysokou teplotu nastavit na přístroji.

Na zařízení bylo provedeno měření teploty s použitím vyřazené DPS, jejíž typ firma opravuje. Vzhledem k nemožnosti použít oficiální držák firmy, byl použit držák univerzální, na němž byla nastavena stejná výška desky od zdroje tepla, jako u oficiálního držáku. Při prvním měření bylo použito nastavení přístroje, jež používá firma pro opravy těchto desek. Tedy $T_{\text{set}} = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$. Měření bylo provedeno profilometrem za použití termočlánků typu K na místě vybrané součástky (SMD keramického kondenzátoru) a je vyobrazeno na obrázku 3.2.



Obr 3.2 Upevnění termočlánků na testovací desce u keramického kondenzátoru (1 na vrchní straně desky, 2 na spodní)

Grafický výstup tohoto měření je vidět na grafu 3.1, přičemž kanály 1 a 2 odpovídají termočlánkům na spodní straně desky pod vybranou součástkou a kanál 3 odpovídá horní straně desky u součástky.

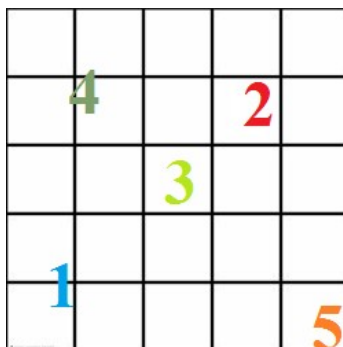


Graf 3.1 Měření teploty na vrchní a spodní straně DPS u vybrané součástky, PCT-1000

Z grafu lze vidět fluktuanci teploty na spodní straně kolem hodnoty $T_s = 74^{\circ}\text{C}$ a na vrchní straně kolem hodnoty $T_v = 65^{\circ}\text{C}$, což potvrdilo nevhodnou funkci přístroje.

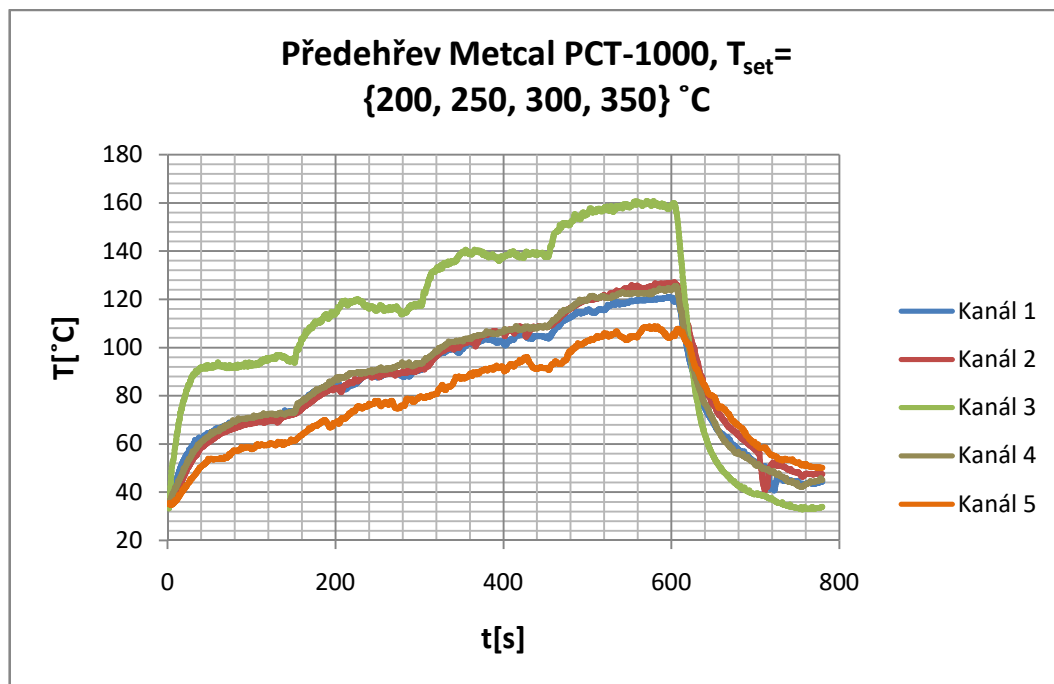
Měření homogenity na mřížce

Další měření bylo provedeno pro zjištění homogenity teploty na mřížce výstupu přístroje. Vzhledem ke čtvercovému tvaru výstupu bylo zvoleno rozmístění pěti použitých termočlánků podle obrázku 3.3.



Obr. 3.3 Rozmístění pěti termočlánků na výstupu přístroje, PCT-1000

Měření bylo odstupňováno na 4 teplotní úseky, přičemž každý trval $t = 150\text{ s}$, což je dostatečná doba pro vyhřátí přístroje na nastavenou teplotu. Testované hodnoty teplot byly $T_{\text{set}} = \{200, 250, 300, 350\}^{\circ}\text{C}$. Grafický výstup měření lze vidět na grafu 3.2, přičemž barvy čar barevně odpovídají rozmístění uvedeným v obrázku číslo 3.3.



Graf 3.2 Měření homogenity teploty na výstupu přístroje, PCT-1000

Z grafu lze vidět nekonstantní, stále se zvyšující teplotní rozdíl mezi zpětnovazebnou teplotou na přístroji a skutečnou teplotou, jenž je pro kanál 5 shrnut v tabulce 3.1. Z velkého rozdílu teplot mezi kanálem termočlánu umístěného uprostřed plochy a ostatními kanály lze rovněž usoudit nehomogenitu teploty po ploše výstupu přístroje.

Tab. 3.2 Odchyly teplot nastavených od změřených na výstupu přístroje, PCT-1000

	$T_{\text{set}\{200\}} [^\circ\text{C}]$	$T_{\text{set}\{250\}} [^\circ\text{C}]$	$T_{\text{set}\{300\}} [^\circ\text{C}]$	$T_{\text{set}\{350\}} [^\circ\text{C}]$
ΔT	≈ 110	≈ 135	≈ 165	≈ 185

Měření maximálního výkonu přístroje

Další měření bylo provedeno pro maximální výkon přístroje, odpovídající $T_{\text{set}} = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$, pro určení teplotního rozdílu na maximální nastavitelné teplotě. Zhodnocení je uvedeno v tabulce 3.3.

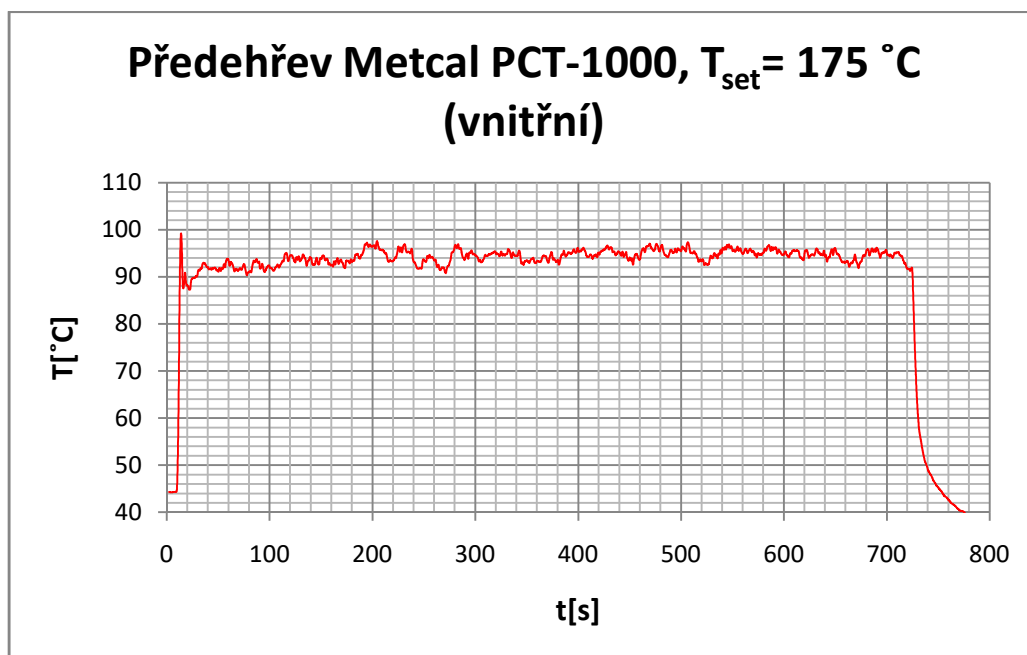
Tab. 3.3 Odchyly skutečné teploty výstupu od nastavené, maximální výkon, PCT-1000

$T_{\text{set}} [^\circ\text{C}]$	$T_{\text{měř}} [^\circ\text{C}]$	$\Delta T [^\circ\text{C}]$
400	≈ 216	≈ 184

Měření teploty na keramickém vedení

Vzhledem k faktu, že přístroj má zabudované zpětnovazebné porovnání teplot, jenž evidentně není měřeno na výstupu přístroje, bylo předpokládáno, že přístroj měří teplotu na vnitřním keramickém vedení horkého vzduchu. Termočlánek byl zaveden skrz výstupní mřížku do keramického vedení a proměřen s nastavenou teplotou $T_{\text{set}} = 175 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Grafické zobrazení měření je uvedeno v grafu 3.3.



Graf 3.3 Měření teploty na vnitřním keramickém vedení vzduchu, PCT-1000

Fluktuanace měřených hodnot je způsobena nemožností dokonale upevnit termočlánek na vnitřní strukturu přístroje, a ten tak v proudícím vzduchu nepatrně kmital. Je evidentní, že zpětnovazební termočlánek není připevněn na vedení vzduchu (rozdíl nastavené a změřené teploty $\Delta T \approx 95\text{ °C}$). Usuzuje se tedy, že zpětná vazba teploty přístroje Metcal PCT-1000 je umístěna v bezprostřední blízkosti topného tělesa, horký vzduch se však po průchodu keramickým vedením k výstupu ochladí, což způsobuje tyto vysoké rozdílové hodnoty.

3.2 Návrh řešení a požadavky firmy Sanmina

Firmou Sanmina-SCI Czech Republic s.r.o. byly specifikovány požadavky na mechanismus přenosu tepla, rozsah teplotní regulace a velikost ohřevné plochy případného nového přístroje, dodatečně poté požadavky na cenu (pořizovací cena stávajícího zařízení se pohybovala kolem 20 000 Kč) a na co nejmenší možný výškový profil zařízení a rozměry zařízení kvůli pohodlnosti obsluhy pracovníků. Tyto požadavky jsou shrnuty v tabulce 3.4.4.

Tab. 3.4 Požadavky firmy Sanmina-SCI Czech Republic s.r.o. na nový přístroj

Požadavek	Specifikace
Mechanismus přenosu tepla:	Radiace/Konvekce
Rozsah teplot:	Do 350 °C
Velikost ohřevné plochy:	$\approx 150\text{ mm} \times 200\text{ mm}$
Pořizovací cena:	Přibližně do 20 000 Kč
Zástavbová výška zařízení:	Nejnižší možná

Vzhledem k negativním výsledkům servisu přístroje je tedy nejlogičtější řešením výměna stávajících zařízení za jiné, vyhovující.

3.2.1 Zařízení WELLER WHP3000

Na základě požadavků zadaných firmou bylo učiněno srovnání přehřevných zařízení dostupných na trhu. Následně bylo vybráno zařízení nejlépe odpovídající požadovaným původním specifikacím (výkon a velikost ohřevné plochy) k otestování.

Vybraným zařízením je infračervený přehřev WELLER WHP3000 ve verzi 1200W. Tabulka 3.5 ukazuje nabízené specifikace přístroje.

Tab. 3.5 Technické parametry infračerveného spodního přehřívacího zařízení WELLER WHP300 1200W [17]

Technický parametr	Hodnota
Rozměry(d×š×v):	395 mm × 254 mm × 70 mm
Výkon:	1200 W
Napájecí napětí:	~230 V
Rozsah teplot:	od 50 °C do 400 °C
Rozměr aktivní plochy:	185 mm × 120 mm

Přístroj zobrazuje nastavenou a zpětnovazebně zobrazenou teplotu, již je možno měřit vnitřně přímo na výstupu, popřípadě externě pomocí termočlánu typu K na vložené desce. V porovnání se stávajícím přístrojem má rovněž větší aktivní plochu. Nevyhovujícím faktorem je pak možná únava očí pracovníka pracující s tímto zařízením, způsobená infračerveným zářením. Přístroj je zobrazen na obrázku 3.4.



Obr. 3.4 Spodní IR přehřev WELLER WHP3000 1200W, převzato z [17]

Přístroj nepodleh testování hlavně díky jasné nepoužitelnosti pro firmu, jež dodatečně specifikovala požadavky na cenu, velikost a nízkoprofilovost zařízení.

Zařízení po ergonomické stránce není výrazně lépe použitelné než stávající a jeho cena se pro firmu ukázala být příliš vysoká (cca 45 000 Kč).

3.2.2 Zařízení SP863DU

Firma SMTPlus.Cz byla ochotna zapůjčit svůj spodní ohřev k otestování. Zařízení více vyhovuje rozměrovým požadavkům firmy Sanmina a vzhledem k faktu, že zařízení pochází z čínské produkce, jedná se i o cenově více dostupné (do 10 000 Kč). Nutné bylo proměřit přístroj z hlediska teplot ke srovnání přístroje se stávajícím. Technické parametry přístroje jsou srovnány v tabulce 3.6.

Tab. 3.6 Technické parametry konvekčního spodního ohřevu SP863DU

Technický parametr	Hodnota
Rozměry(d×š×v):	238 mm × 170 mm × 62 mm
Výkon:	700 W
Napájecí napětí:	230 V
Rozsah teplot:	od 110 °C do 250 °C
Rozměr aktivní plochy:	68 mm × 145mm

Přístroj zobrazuje pouze zpětnovazebně vedenou teplotu na mřížce výstupu konvekčního ohřevu, což vede k problematickému nastavení, neboť pracovník před ustálením teplot neví, na jakou teplotu přístroj nastavil. Je vybaven ovšem možností chlazení, odpojením vytápění a použitím proudu chladného vzduchu. Přístroj je zobrazen na obrázku 3.5.

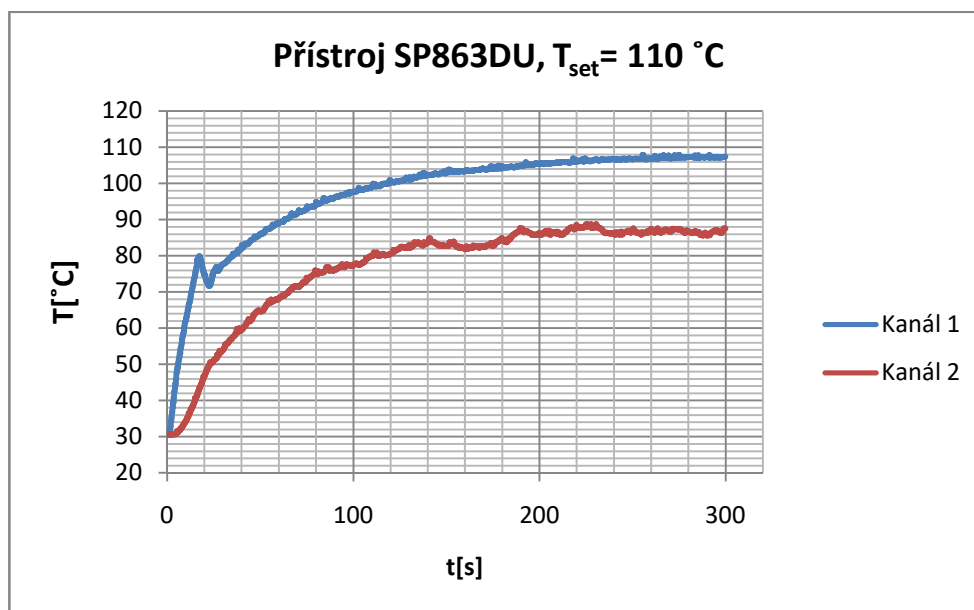


Obr. 3.5 Spodní přehřev SP863DU

Měření teploty na vrchní a spodní straně DPS

První měření bylo provedeno identicky jako první měření kapitoly 3.1.1, s rozdílem použití pouze jednoho termočlánku na spodní stranu DPS místo dvou a jeho grafický výstup je možno vidět na grafu 3.4. Vzhledem k faktu, že nejnižší možná nastavitelná ohřevná teplota na přístroji je $T_{\min} = 110\text{ °C}$, byla použita právě tato se snahou dosáhnout

podobného výsledku jako v prvním měření kapitoly 3.1.1.



Graf 3.4 Měření teploty na vrchní a spodní straně DPS u vybrané součástky, SP863DU

V tabulce 3.7 je vidět rozdíl teploty zpětnovazebně vedené přístroje od teploty naměřené na spodní a vrchní straně desky u vybrané součástky.

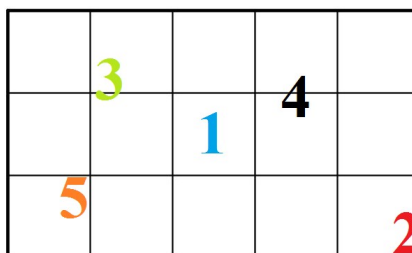
Tab. 3.7 Rozdíl teploty zobrazené přístrojem od teploty naměřené

$T_{\text{set}} = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{měř}} [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$
Vrchní strana DPS	≈ 87	≈ 23
Spodní strana DPS	≈ 107	≈ 3

Pokud porovnáme rozdíly teplot přístroje SP863DU a přístroje Metcal PCT-1000, je jednoznačné, že teploty zobrazené na přístroji SP863DU jsou zpětnovazebně vedeny přímo z výstupu.

Měření homogenity na mřížce přístroje

Další měření bylo provedeno pro zjištění homogenity teploty na výstupu přístroje. Vzhledem k obdélníkovému tvaru výstupu bylo zvoleno rozmístění pěti použitých termočlánků podle obrázku 3.5.



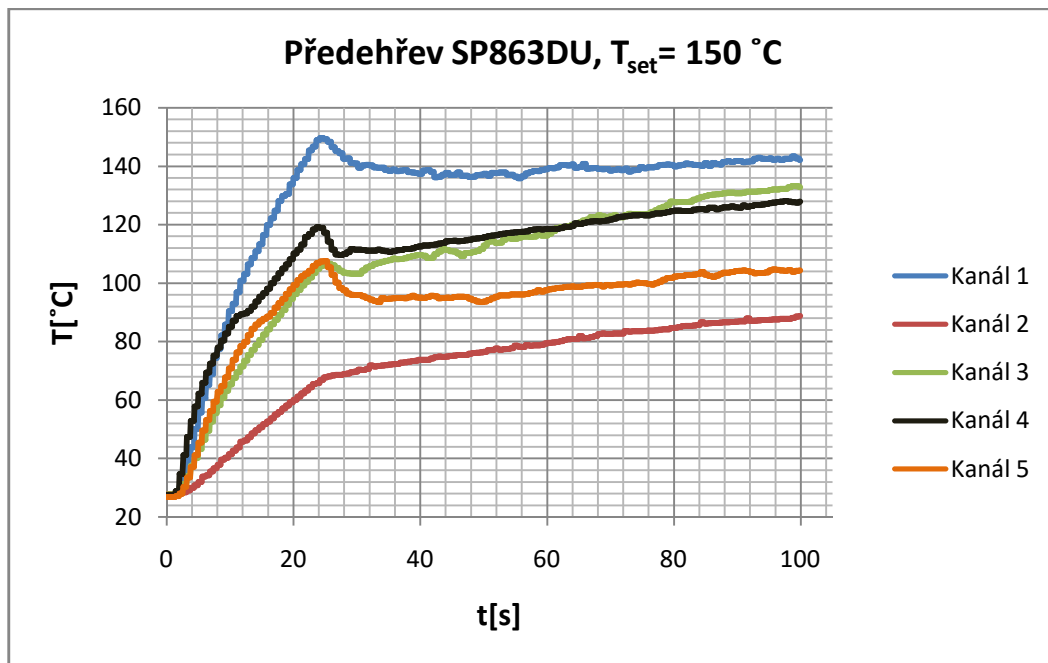
Obr. 3.5 Rozmístění termočlánků na obdélníkovém výstupu přístroje, SP863DU

Měření homogenity teploty výstupu přístroje

Vzhledem k nemožnosti nastavit na přístroji teplotní profil, v němž by se automaticky

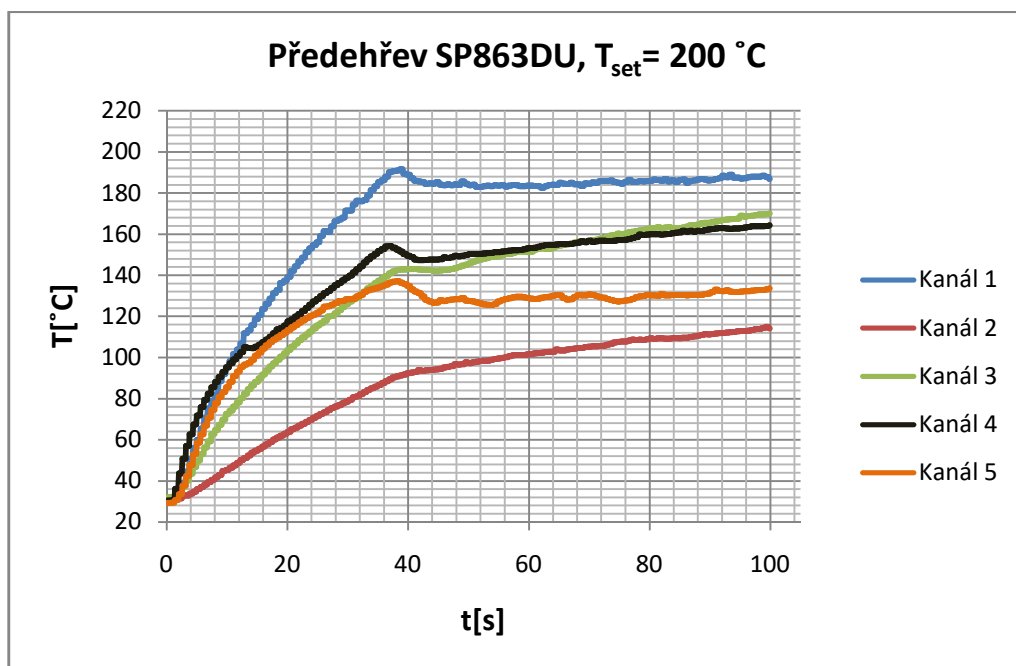
přepínaly po určité době úrovně teploty, byly provedeny 3 měření homogenity teploty při různém nastavení. Grafický výstup měření pro $T_{\text{set}} = 150\text{ °C}$ je vyobrazen na grafu 3.5, grafický výstup měření pro $T_{\text{set}} = 200\text{ °C}$ je vyobrazen na grafu 3.6 a grafický výstup měření pro $T_{\text{set}} = 250\text{ °C}$ je vyobrazen na grafu 3.7, přičemž barvy čar a čísla kanálů odpovídají obrázku 3.5.

1. Měření teplotní homogenity



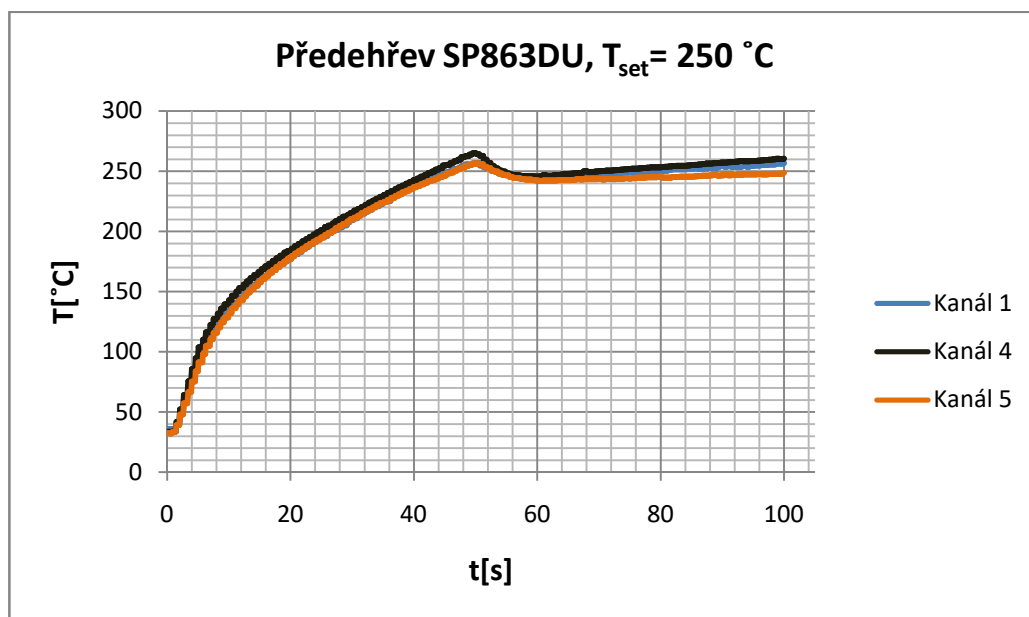
Graf 3.5 Měření homogenity teploty na výstupu přístroje pro teplotu $T_{\text{set}} = 150\text{ °C}$, SP863DU

2. Měření teplotní homogenity



Graf 3.6 Měření homogenity teploty na výstupu přístroje pro teplotu $T_{\text{set}} = 200\text{ °C}$, SP863DU

3. Měření teplotní homogenity



Graf 3.7 Měření homogenity teploty na výstupu přístroje pro teplotu $T_{\text{set}} = 250\text{ °C}$, SP863DU

Teplota $T_{\text{set}} = 250\text{ °C}$ byla rovněž maximální nastavitelnou teplotou přístroje, v průběhu měření se ale porouchaly termočlánky připojené na kanál 2 a na kanál 3, proto jsou z grafického zhodnocení vyřazeny. Tabulka 3.8 shrnuje odchýlení teplot v prvním, druhém a třetím měření od nastavené teploty na přístroji.

Tab. 3.8 Rozdíly naměřených hodnot od nastavených na přístroji, SP863DU

	$\Delta T_1\text{ [°C]}$ ($T_{\text{set}} = 150\text{ °C}$)	$\Delta T_2\text{ [°C]}$ ($T_{\text{set}} = 200\text{ °C}$)	$\Delta T_3\text{ [°C]}$ ($T_{\text{set}} = 250\text{ °C}$)
Kanál 1	≈ 10	≈ 15	≈ -10
Kanál 2	≈ 70	≈ 90	X
Kanál 3	≈ 30	≈ 40	
Kanál 4	≈ 30	≈ 40	≈ -10
Kanál 5	≈ 50	≈ 70	≈ 0

Přístroj tedy rovněž neudrží teplotu po celé ploše výhřevu, s tím, že čím více je termočlánek vzdálen od středu plochy, tím větší rozdíl teploty se zde vyskytne, výsledky jsou však o mnoho lepší než u přístroje Metcal PCT-1000 v kapitole 3.1.1.

3.2.3 Zařízení Quick 854 ESD

Jako další zařízení byl vytipován keramický infračervený spodní ohřev značky Quick, typu 854 ESD. Zařízení poněkud lépe splňuje požadavky na velikost i nízký výškový profil zařízení a cenu (cca 14 000 Kč). Zařízení pochází z čínské produkce. Jeho technické parametry jsou shrnuty v tabulce 3.9 a je vyobrazeno na

Tab. 3.9 Technické parametry infračerveného spodního ohřevu, Quick 854 ESD [18]

Technický parametr	Hodnota
Rozměry(d×š×v):	264 mm × 200 mm × 65 mm
Výkon:	400 W
Napájecí napětí:	230 V
Rozsah teplot:	od 50 °C do 350 °C
Rozměr aktivní plochy:	125 mm × 125 mm

Teplota je u přístroje zpětnovazebně řízená přes termočlánek na výstupu a zobrazuje jak nastavenou, tak zpětnovazebně vedenou teplotu. Přístroj je vyobrazen na obrázku 3.6.

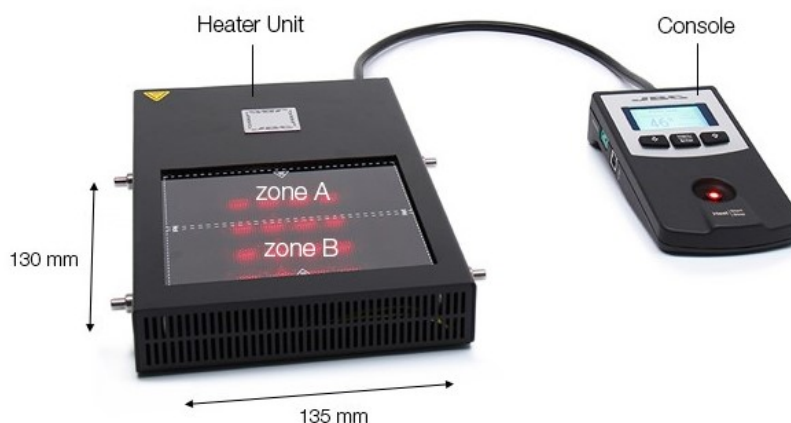


Obr. 3.6 Infračervený spodní předehřev Quick 854 ESD, převzato z [18]

O zapůjčení přístroje bylo jednáno s firmou HotAir.cz, ovšem bezúspěšně, neboť k zapůjčení bylo firmou vyžadováno uhrazení celé částky přístroje, jež by byla vrácena po smluvené zápujční době, což bylo z finančních důvodů zamítnuto. Testování přístroje tedy nemohlo proběhnout. Přesto se podle technických specifikací jeví jako vhodné.

3.2.4 Další navržené přístroje

Jako jedno z nabízených možností přímo pracovníky firmy, byl navržen infračervený spodní předehřev JBC PHS-2B, jenž je zobrazen na obrázku 3.7.



Obr. 3.7 Infračervený spodní předehřev JBC PHS-2B, převzato z [19]

Přístroj splňuje zásadní požadavek na výšku zástavby (41 mm), nicméně nemá odstíněné viditelné spektrum infračerveného záření, což je pro dlouhodobější práci nepoužitelné kvůli únavě očí pracovníků. Přístroj také nesplňuje cenovou relaci (cena je cca 29 000 Kč).

Jako poslední navržený přístroj splňující rámcově požadavky firmy je konvekční ohřev PACE ST450, vyobrazen na obrázku obr. 3.8.



Obr. 3.8 Konvekční spodní předehřev PACE ST450, převzato z [20]

Zařízení je podobné přístroji SP863DU z kapitoly 3.2.2, nicméně nesplňuje požadavky na cenu (přibližně 25 000 Kč) a na nízkou zástavbovou výšku (10.41 cm). [20]

3.2.5 Problémy se zapůjčováním přístrojů

Pro přesné určení vyhovujícího přístroje vhodného pro firmu je nutné vytipované přístroje podrobit měření teploty a optické kontrole, jež určí jeho využitelnost. Ideální proto je zapůjčit si testovací kus. Právě toto zapůjčení kusu pro měření se ukázalo být

největším problémem, neboť distributoři těchto vytipovaných přístrojů nebyli ochotni bez záruky zapůjčit kus k proměření.

Z tohoto důvodu byly zapůjčeny pouze dvě zařízení (viz kapitoly 3.2.1; 3.2.2) přičemž měření bylo provedeno pouze na přístroji SP863DU.

3.2.6 Shrnutí navržených zařízení

Podle požadavků firmy Sanmina-SCI Czech Republic s.r.o. uvedených v kapitole 3.2, bylo provedeno srovnání navržených modelů předeřevů na základě toho, zda přístroj vyhovuje (✓) či nevyhovuje (✗) požadavkům. Srovnání ukazuje tabulka 3.10. U řádku "Zástavbová výška:" je v kolonkách uvedeno číslo od nejmenšího po největší, značící seřazení přístrojů od nejvíce vyhovujících (1) po nejméně vyhovující (5), vzhledem k nepřesnosti zadání parametru.

Tab. 3.10 Srovnání požadavků firmy Sanmina-SCI Czech republic s.r.o. se specifikací navržených přístrojů

	WELLER WHP3000	SP863DU	QUICK 854 ESD	JBC PHS- 2B*	PACE ST450
Mechanismus přenosu tepla:	✓	✓	✓	✓	✓
Rozsah teplot ohřevu:	✓	✗	✓	✓	✓
Cena:	✗	✓	✓	✗	✗
Velikost ohřevné plochy:	✓	✗	✓	✓	✗
Zástavbová výška:	4	3	2	1	5

*přístroj nevyhovuje v důsledku neodstínění viditelného spektra infračerveného záření

Z tabulky lze usoudit, že nejvhodnějším přístrojem podle požadavků firmy bude přístroj QUICK 854 ESD.

3.2.7 Alternativní řešení

Jeden ze zadaných požadavků na zařízení je co nejnižší zástavbová výška přístroje. Tento požadavek vznikl kvůli pohodlí pracovníků, jež by z práce na přístroji, jenž je vyvýšen nad úroveň mohly bolet ruce. Tomuto požadavku by se dalo však vyhovět alternativní cestou s jakýmkoliv přístrojem a to úpravou pracoviště. Jeho ukázka je na obrázku 3.9.



Obr. 3.9 Ukázka pracoviště firmy Sanmina-SCI Czech Republic s.r.o.

Pokud by byl upraven stůl, do nějž by bylo možné zapustit přehřevné zařízení, problémy s nepohodlím by se mohly zcela eliminovat. Další možností je používat podložky pod předloktí, jež by rovněž odstranily problémy s nepohodlím.

4 LOKÁLNÍ SPODNÍ OHŘEV DPS

Při používání spodního přehřevu u oprav DPS velikost teploty ohřevu ovlivňují faktory daného kusu (viz kapitola 2.2.2). Nejen z těchto důvodů je teoreticky výhodné použít možnost přehřátí celé desky na základní teplotu a v lokaci předmětu opravy teplotu lokálně zvýšit na požadovanou hodnotu, což by zefektivnilo celý proces.

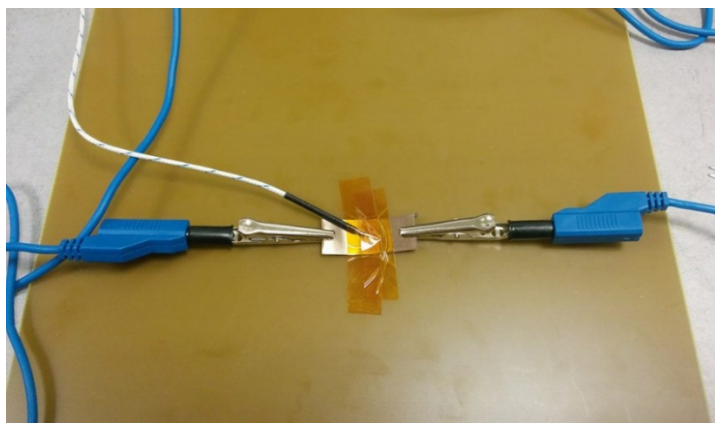
Předmětem této kapitoly je tedy vytvořit experimentální zařízení, jež by se mohlo po kombinaci se zařízením spodního ohřevu využít k tomuto komplexnímu ohřevu desek. Zařízení musí být rovněž dostatečně tenké, aby nezpůsobilo příliš velkou vzdálenost DPS od základního ohřevu (a tedy nežádoucího rozdílu mezi nastavenou a skutečnou teplotou). Pro zařízení bylo předem zvoleno použití přenosu tepla pomocí konvekce nebo radiace.

4.1 Návrh topného tělesa

Pro co nejmenší rozdíl mezi teplotou na topném tělese ohřevu a na desce bylo rozhodnuto o umístění topného tělesa co nejbližší DPS, v ideálním případě tedy do určitého typu sondy pod ni. V takovém případě však celá tato sonda i topné těleso v ní musí být dostatečně tenké. Pro výrobu takového topného tělesa o malé hloubce bylo testováno více materiálů.

4.1.1 Odporový plech

Jako jeden z možných materiálů pro výrobu topných těles je manganin (viz kapitola 1.1.1). Testován byl manganinový plíšek o rozměrech 35 mm x 14 mm x 0.1 mm, jenž byl zatížen zdrojem Statron 3234.4, a teplota na něm byla snímána termočlánkem typu K, viz obrázek.



Obr. 4.1 Měření teploty zatíženého manganinového plíšku

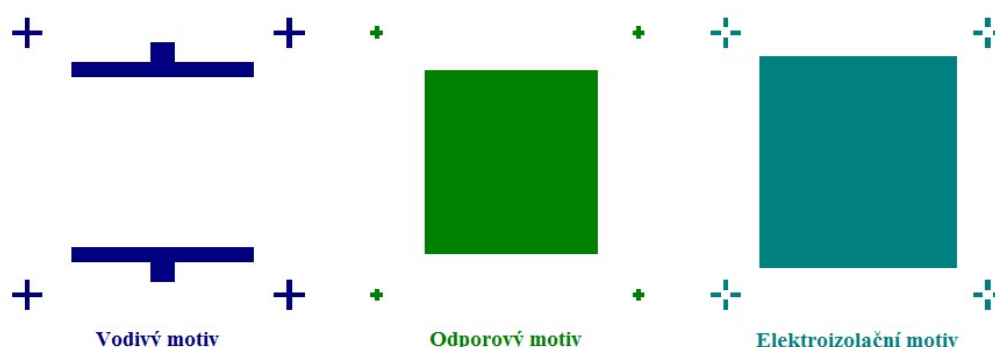
Předmětem měření byla teplota vzorku, jímž protékal nejvyšší možný zdroj dodatečný proud. Proudové omezení zdroje je stanoveno na $I = 32.6 \text{ A}$, jehož bylo u vzorku dosaženo při napětí $U = 2.5 \text{ V}$, z čehož jde dle Ohmova zákona určit odpor vzorku $R = 0.0767 \Omega$.

Pod tímto zatížením dosáhl vzorek maximální teploty $T = 235 \text{ °C}$ za čas $t = 24 \text{ s}$. Manganin je však materiál všeobecně využívaný k ohřevu do teploty maximálně

$T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, neboť po přesažení této teploty nastává tepelná deformace a velké zvýšení elektrického odporu. Manganin tedy není vhodný k výrobě topných těles do spodních přehřevných zařízení, více vhodným by byl plech z odolnějších odporových materiálů (chromnikl, kanthal), v malém množství však plechy z těchto materiálů nejsou dostupné.

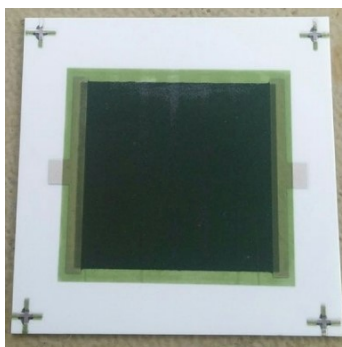
4.1.2 Topné těleso s použitím TLV technologie

Navrhované topné těleso je kombinovaného typu (viz kapitola 1.1.1) a je realizováno TLV technologií na keramice o rozměru přibližně $50.8\text{ cm} \times 50.8\text{ cm} \times 0.635\text{ mm}$. Kdy aktivní plocha topného tělesa dosahuje rozměrů $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$. Návrh byl proveden v programu Eagle 7.2.0 a je zobrazen na obrázku.



Obr. 4.2 Návrh všech tří šablon vrstev k vytvoření topného TLV článku

Zhotovené topné těleso je vyobrazeno na obrázku.



Obr. 4.3 Vyrobený prototyp topného tělesa

Toto topné těleso bylo vyrobeno akademickým pracovníkem FEKT VUT a vzhledem ke špatné komunikaci (jež vedla i k nedodání informací o použitém materiálu) byla použita pasta o jmenovitém odporu $R_{\square} = 20\text{ }\Omega/\square$, přičemž návrh je čtvercového tvaru, odpor článku je tedy $R = 20\text{ }\Omega$. Tato hodnota způsobuje vysokou výkonovou zatížitelnost a vzhledem k faktu, že k ohřevu je daný zdroj s určitým maximálním odběrem, je topné těleso pro účel práce nepoužitelné. I přesto bylo provedeno měření teploty pod maximálním zatížením (viz kapitola 4.1.1).

Nejvyšší možné napětí na použitém zdroji je definováno výrobcem $U = 16\text{ V}$, proud protékající tělesem je tedy $I = 0.8\text{ A}$. Vzorek se pod tímto zatížením dokázal za dobu $t = 42\text{ s}$ vyhřát na teplotu $T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Topný článek byl použit pro experimentální spodní ohřev DPS na dodaném přípravku od společnosti Sanmina-SCI. Měření bylo provedeno na spodní straně základního jednostranně plátovaného materiálu FR4, pro znázornění viz obrázek 4.4.



Obr. 4.4 Měření teploty na spodní straně DPS (jenž je pro názornou ukázkou odejmuta)

Tímto způsobem byla změřena teplota na spodní straně DPS $T = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je nedostatečným výsledkem pro použití ve spodním ohřevném zařízení.

4.1.3 Odporový drát

Jako další prototyp topného tělesa byl testován kanthalový odporový drát o parametrech, jež jsou shrnuty v tabulce 4.1.

Tab. 4.1 Parametry odporového drátu

Materiál:	Rezistivita:	Délka:	Průměr:	Odpor vzorku:
FeCrAl	$4.2\text{ }\Omega/\text{m}$	0.3 m	0.65 mm	$1.26\text{ }\Omega$

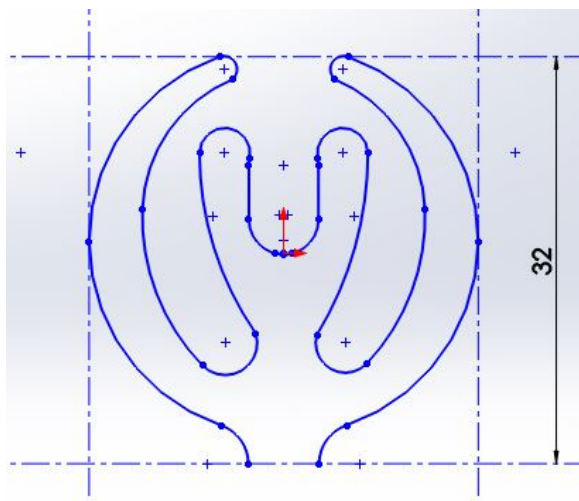
Rovněž bylo provedeno experimentální měření dosažitelné teploty (viz kapitola 4.1.1). Drát byl při maximálním výkonu na zdroji ($P_{\text{zmax}} = 219\text{ W}$) schopen dosáhnout teplot přesahujících $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Výkon dodaný do drátu byl zvolen na hodnotu $P = 65\text{ W}$, což by mělo být dostačující, neboť v těchto hodnotách se pohybují horkovzdušné příruční nástroje. Ze vzorce pro výpočet výkonu a Ohmova zákona byla zjištěna hodnota napětí, jež je potřeba nastavit na zdroji:

$$P = R \cdot I^2 \rightarrow I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{65}{1.26}} = 7.18\text{ A}$$

$$U = R \cdot I = 1.26 \cdot 7.18 = 9.05\text{ V}$$

Odporový drát byl zvolen jako konečné topné těleso přístroje a natvarován do mřížky velikosti $32\text{ mm} \times 32\text{ mm}$, viz obrázek 4.5.



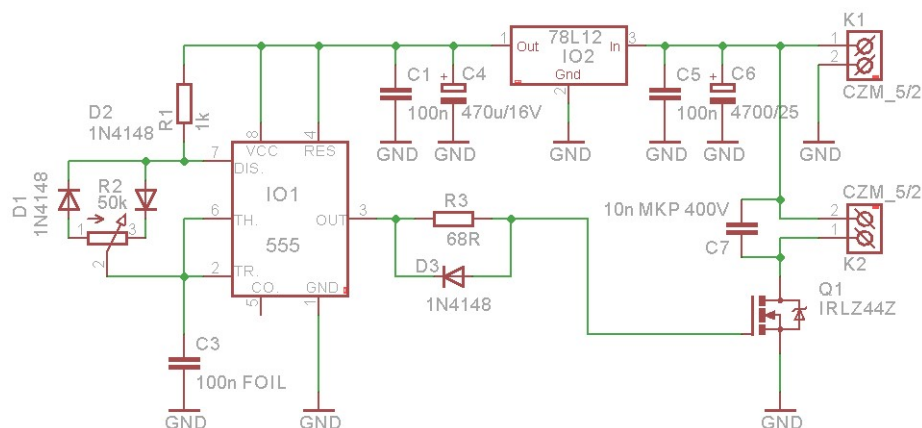
Obr. 4.5 Náskres natvarování odporového drátu

4.2 Regulace teploty na zařízení

Řízení teploty na výstupu celého zařízení je provedeno pomocí regulace výkonu odporového drátu, jež je realizována pulzně šířkovou modulací (= pulse width modulation, dále jen PWM).

4.2.1 Návrh obvodu PWM

Pro pulzně šířkovou modulaci byl navržen obvod s využitím časovače 555 a spínaného tranzistoru MOSFET. Schéma obvodu je možno vidět na obrázku 4.5.

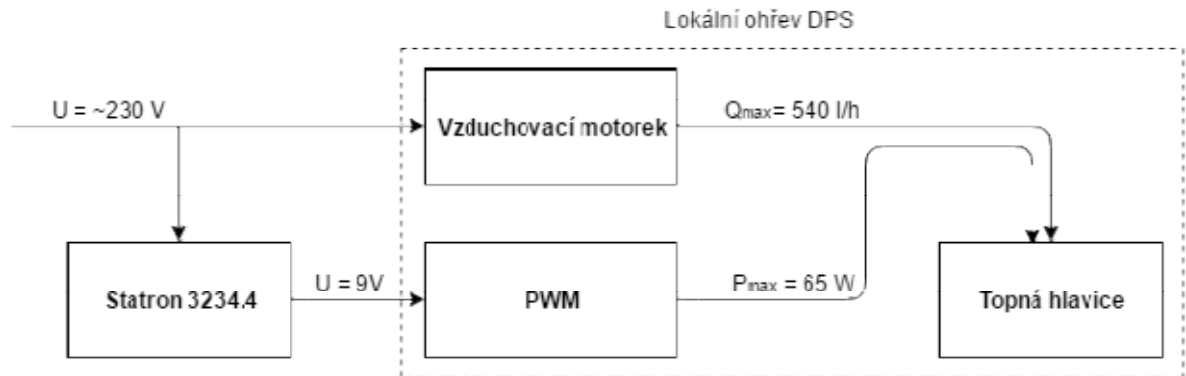


Obr. 4.5 Schéma zapojení obvodu PWM

Kvůli úbytku usměrňovacích diod se výsledná hodnota výkonu pohybuje v rozpětí 5 % až 95 % maximálního výkonu, což bude mít minimální vliv na chod celého zařízení. Součástky byly dimenzovány s větší rezervou z důvodu potenciální chyby nastavení zdroje, kondenzátor C7 nakonec do skutečného obvodu nebyl zapojen, kvůli špatné dostupnosti u dodavatelů součástek, vzhledem k jeho funkci filtrace rušení však tato skutečnost nemá na chod obvodu vliv. Návrh DPS je možno vidět v příloze 1.

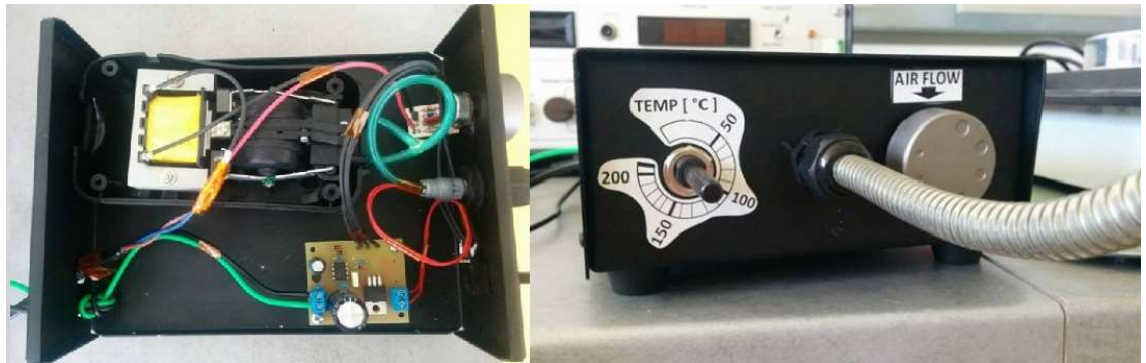
4.3 Konstrukce

Zařízení využívá jak přenosu tepla pomocí konvekce, tak radiace, neboť topné těleso není stíněno. Systém spočívá v topné hlavě na ohebném nastavitelném husím krku, jenž slouží rovněž jako vedení vzduchu z kompresorku a vedení kabeláže k topnému tělesu. Blokové schéma přístroje je možno vidět na obrázku 4.6.



Obr. 4.6 Blokové schéma přístroje lokálního spodního ohřevu DPS

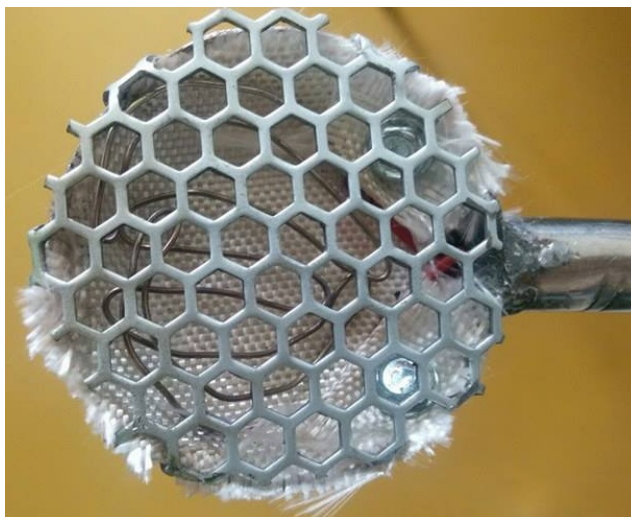
Vnitřní uspořádání a vzhled ovládací části (regulace teploty a průtoku vzduchu) přístroje jsou poté vyobrazeny na obrázku 4.7.



Obr. 4.7 Vnitřní uspořádání (vlevo) a vzhled ovládací části (vpravo) přístroje lokálního spodního ohřevu DPS

4.3.1 Výstupní topná hlavice

Topná hlavice přístroje je zkonstruovaná z ocelových dílů, formující trychtýř s bočním vývodem. Elektrická a tepelná izolace ocelových částí je zajištěna vrstvenou skelnou tkaninou. Elektrické propojení kabeláže s odporovým drátem je realizováno ovinutím měděným drátem a následným slisováním, těleso je poté uchyceno v hlavici šrouby. Vrchní strana hlavice je zajištěna ocelovou mřížkou. Topná hlavice je vyobrazena na obrázku 4.8.



Obr. 4.8 Topná hlavice zařízení lokálního ohřevu

4.3.2 Kompresor

Jako zdroj proudu vzduchu byl zvolen vzduchovací akvarijní motorek JK Animals Atman JKAP9500, jehož základní parametry jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Tab. 4.2 Parametry akvarijního vzduchovacího motorku Atman JKAP9500 [21]

Napájecí napětí:	Příkon:	Počet vývodů:	Maximální proud vzduchu:
~ 230 V	4,8 W	2	270 l/h

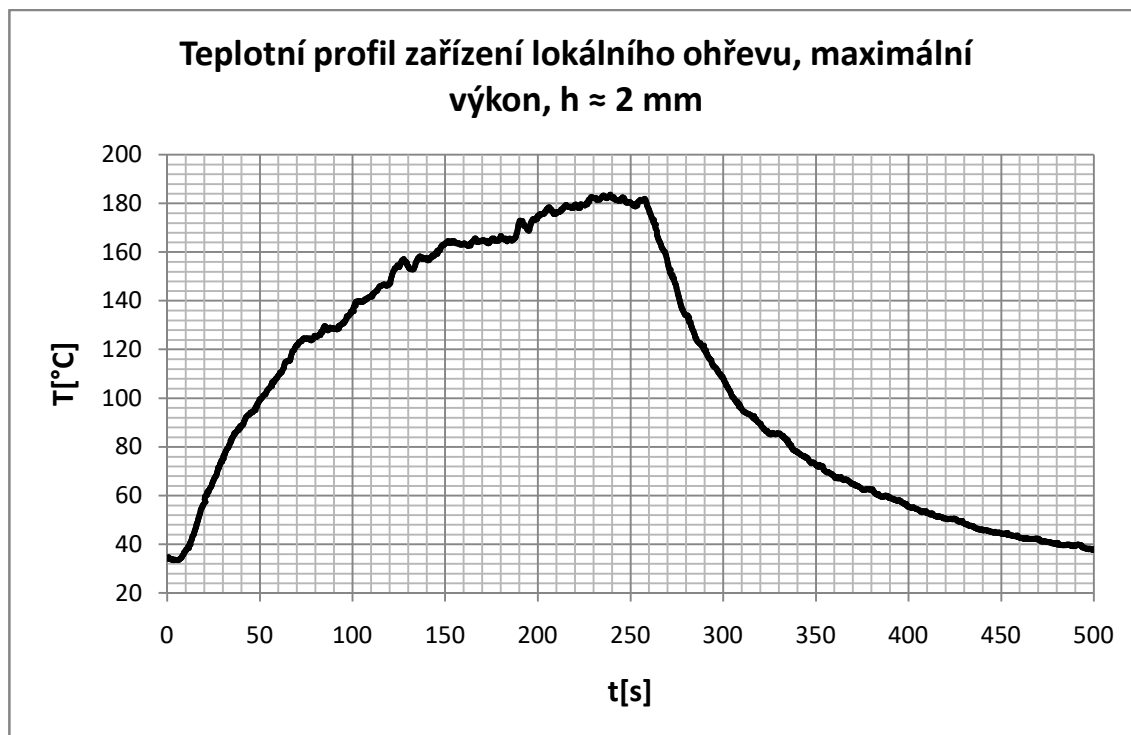
Po spojení obou vývodů je možno dosáhnout proudu vzduchu $Q_{\max} = 540 \text{ l/h}$, což je dostatečná hodnota. Regulace proudu vzduchu byla přesunuta na ovládací stranu přístroje.

Další možností zdroje vzduchu bylo použití elektrického větráku (např. ze skříně počítače), tyto větráky ale nemají dostatečný vztlak a po zkoncentrování do malého průměru trubičky by odpor vzduchu vedení byl příliš veliký.

4.4 Testování rychlosti vyhřátí a maximálního výkonu

Zařízení bylo podrobeno testování na základě maximální teploty dosažitelné zařízením na přířezu jednostranně plátované FR4 mědi o tloušťce 35 mikronů, velikosti přibližně $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, kvůli zjištění gradientu teploty na DPS.

Pomocí bylo provedeno měření z ohledu teplotního gradientu na spodní straně DPS. Topná hlavice byla v tomto případě umístěna do vzdálenosti $h \approx 2 \text{ mm}$ od přířezu. Měřící termočlánek byl umístěn přímo nad střed topné hlavy zařízení. Grafický výstup měření je vyobrazen v grafu 4.1.



Graf 4.1 Teplotní profil lokálního ohřevu na spodní straně přířezu DPS, maximální výkon zařízení, $h \approx 2 \text{ mm}$

Z počáteční teploty $T_0 = 34 \text{ °C}$ se přířez zahřál na $T = 185 \text{ °C}$ za dobu $t = 220 \text{ s}$ což odpovídá teplotnímu gradientu $q_t = 0.686 \text{ °C} \cdot \text{s}^{-1}$ (viz rovnice 1.8), což je uspokojivý výsledek, vzhledem k velké ploše chlazení neopracovaného přířezu.

V čase $t = 260 \text{ s}$ bylo zapnuto chlazení (odpojeno napájení) tělesa. Zařízení se za dobu $t = 240 \text{ s}$ zchladilo z $T_0 = 185 \text{ °C}$ na $T = 40 \text{ °C}$, což odpovídá teplotnímu gradientu $q_t = -0.604 \text{ °C} \cdot \text{s}^{-1}$.

4.5 Testování funkce zařízení v kombinaci se spodním ohřevem

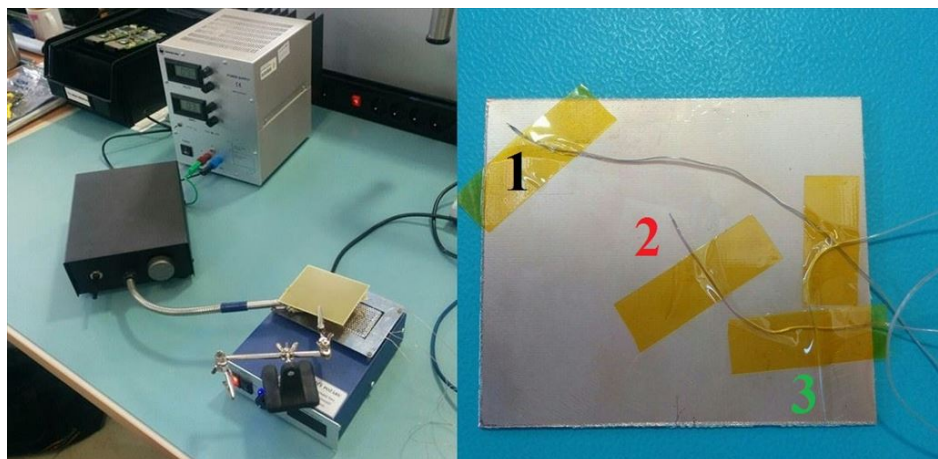
Lokální spodní ohřev DPS byl poté zkombinován s přístrojem SP863DU, přičemž bylo provedeno srovnání teplot na DPS při použití lokálního ohřevu a bez použití lokálního ohřevu. Toto srovnání proběhlo na dvojím nastavení teplot, jež je uvedeno v tabulce 4.3.

Tab. 4.3 Nastavení přístrojů při srovnávání změřených teplot lokálního a základního ohřevu

	Měření 1	Měření 2
	Nastavená teplota [°C]	Nastavená teplota [°C]
Lokální ohřev DPS	120	160
SP863DU	160	200

K měření byl použit profilometr se třemi kanály (termočlánky typu K), jejichž rozmístění na přířezu DPS je možno vidět na obrázku 4.9. Na obrázku 4.9 lze rovněž

vidět měřící pracoviště.

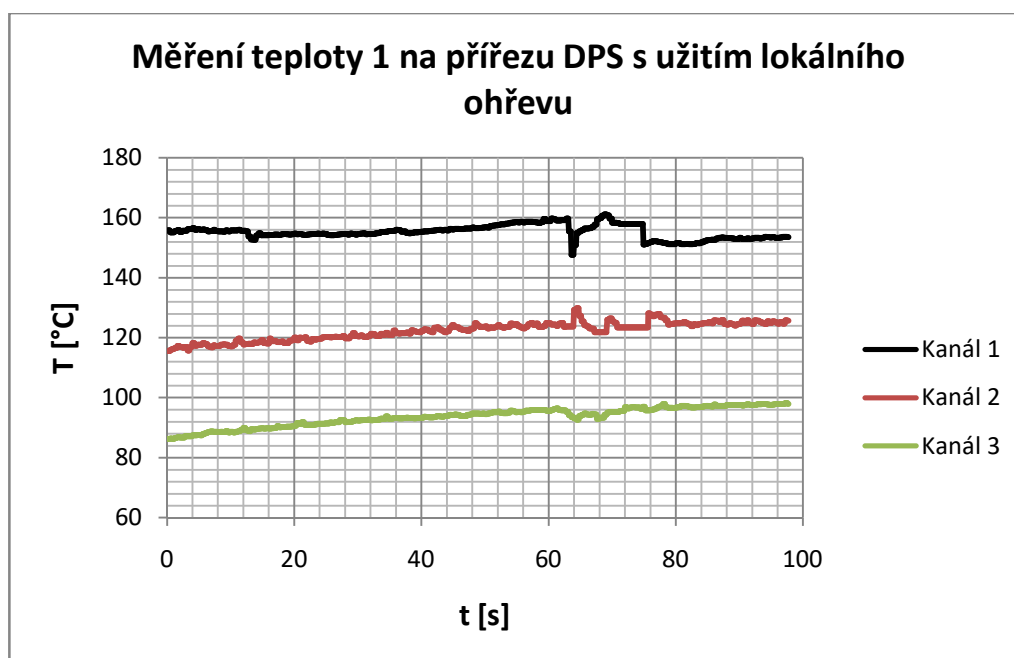


Obr. 4.9 Měřící pracoviště (vlevo) a rozmístění termočlánků na přířezu DPS (vpravo)

Termočlánek kanálu 1 byl umístěn na lokaci lokálního ohřevu (na níž se potenciálně nachází i opravovaná součástka), termočlánek kanálu 2 byl umístěn přibližně na střed aktivní plochy ohřevu SP863DU a termočlánek kanálu 3 byl umístěn na kraj aktivní plochy ohřevu SP863DU.

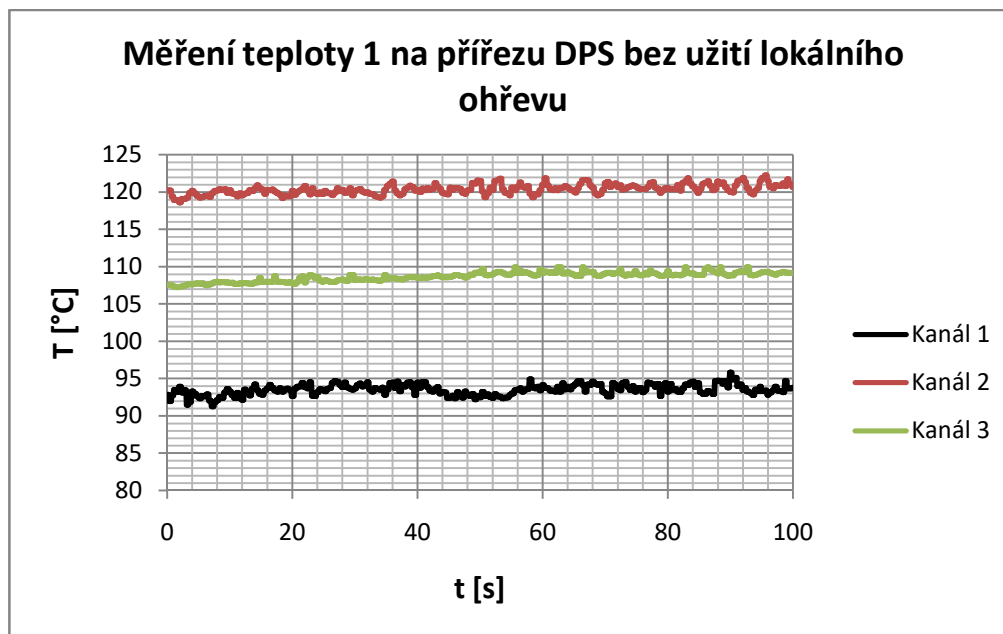
4.5.1 Měření 1 a porovnání

První měření bylo provedeno s přiloženou hlavicí lokálního ohřevu do vzdálenosti $h \approx 1$ mm na lokaci kanálu 1. Jeho grafický výstup je vyobrazen v grafu 4.2.



Graf 4.2 Měření teploty 1 na přířezu DPS s užitím lokálního ohřevu

Následovalo měření provedené bez přiložené hlavy lokálního ohřevu na lokaci kanálu 1. Jeho grafický výstup je vyobrazen v grafu 4.3.



Graf 4.3 Měření teploty 1 na přířezu DPS bez užití lokálního ohřevu

Srovnání dosažených teplot na kanálech bez použití a s použitím lokálního ohřevu je vyhodnoceno v tabulce 4.4.

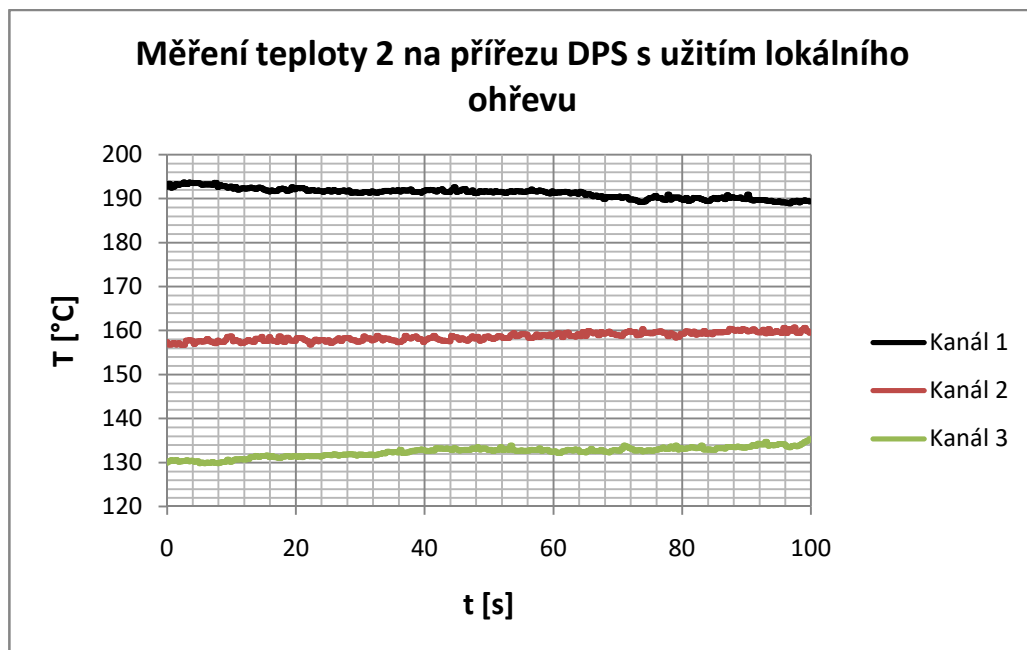
Tab. 4.4 Srovnání dosažených teplot na jednotlivých kanálech při měření 1

	Kanál 1 [°C]	Kanál 2 [°C]	Kanál 3 [°C]
S použitím lokálního ohřevu	≈ 155	≈ 125	≈ 95
Bez použití lokálního ohřevu	≈ 94	≈ 120	≈ 107

Pokud by tedy součástka byla umístěna na lokaci termočlánku kanálu 1, byla by při použití lokálního ohřevu přivedena na větší teplotu, což by technikovi výrazně usnadnilo práci. Lokální ohřev tedy účinně potlačil nehomogenitu rozložení tepla na desce a vyhrál lokaci v rozdílu teplot $\Delta T = 60\text{ °C}$.

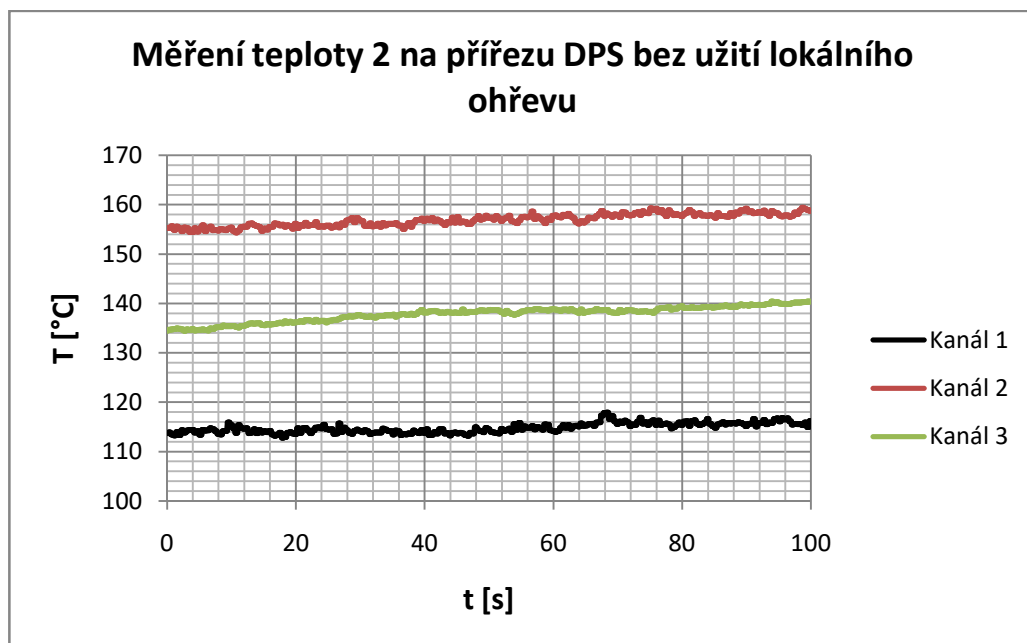
4.5.2 Měření 2 a porovnání

Druhé měření bylo provedeno s přiloženou hlavicí lokálního ohřevu do vzdálenosti $h \approx 1\text{ mm}$ na lokaci kanálu 1. Jeho grafický výstup je vyobrazen v grafu 4.4.



Graf 4.4 Měření teploty 2 na přířezu DPS s užitím lokálního ohřevu

Následovalo měření provedené bez přiložené hlavy lokálního ohřevu na lokaci kanálu 1. Jeho grafický výstup je vyobrazen v grafu 4.5.



Graf 4.5 Měření teploty 2 na přířezu DPS bez užití lokálního ohřevu

Srovnání dosažených teplot na kanálech bez použití a s použitím lokálního ohřevu je vyhodnoceno v tabulce 4.5.

Tab. 4.5 Srovnání dosažených teplot na jednotlivých kanálech při měření 2

	Kanál 1 [°C]	Kanál 2 [°C]	Kanál 3 [°C]
S použitím lokálního ohřevu	≈ 190	≈ 160	≈ 133
Bez použití lokálního ohřevu	≈ 115	≈ 155	≈ 135

Stejně jako ve vyhodnocení měření v kapitole 4.5.1, na lokaci termočlásku kanálu 1 se při použití lokálního ohřevu podařilo dosáhnout lokálně vyšší teploty, což by příznivě ovlivnilo proces opravy. Rozdíl teplot na lokaci mezi dvěma měřeními byl $\Delta T = 75\text{ °C}$.

4.5.3 Praktické ozkoušení pracovníky firmy Sanmina-SCI Czech Republic s.r.o.

Proběhlo rovněž praktické odzkoušení přístroje pracovníky firmy Sanmina-SCI Czech Republic s.r.o., jehož obsahem bylo porovnání teplotních průběhů na opravované DPS s velkou zástavbovou hustotou.

Konkrétně se porovnával teplotní průběh (pro testování bylo použito zařízení Metcal PCT-1000) bez užití lokálního ohřevu a teplotní průběh s využitím lokálního ohřevu. Toto testování proběhlo bez problémů a pracovníci firmy vyhodnotili výsledky jako vyhovující.

5 ZÁVĚR

V bakalářské práci byla provedena rešerše na téma fyzikálního jevu tepla, mechanismů jeho přenosu a spojení tohoto tématu s tématem použití spodního předeřevu v opravách osazených desek plošných spojů. Rovněž byly rozebrány vlivy, jež ovlivňují homogenitu rozložení teploty na osazených deskách plošných spojů.

Byl rozebrán problém firmy Sanmina-SCI Czech Republic s.r.o. s nevyhovujícím spodním předeřevem použitým v produkci typu Metcal PCT-1000. Přístroj vykazuje vysokou fluktuanci teploty a extrémní rozdíl mezi teplotami nastavenými na přístroji a měřenými na spodní straně DPS (ΔT od 110 °C do 185 °C). Byl zapůjčen přístroj značky Weller, jenž však nevyhověl ergonomickým požadavkům firmy. Byl otestován zapůjčený přístroj firmy SMTPlus.Cz, jenž však nevyhovuje požadavkům na něj kladeným z hlediska rozměrů a aktivní plochy. Navrženy byly další přístroje, jejichž zapůjčení z finančních důvodů nebylo možné, určitý z nich se však jeví jako velmi vhodný.

Bylo provedeno testování vhodného materiálu pro realizaci topného tělesa, jež by mohlo být použito při lokálním ohřevu desky plošných spojů. Testován byl odporový plech, těleso vyrobené TLV technologií a odporový drát. Z technických důvodů se ukázal jako nejvhodnější odporový topný drát, jenž byl použit pro výrobu topného tělesa.

S použitím zvoleného odporového drátu bylo zkonstruováno topné těleso o rozměrech přibližně 32 mm × 32 mm. Následně k němu byla navržena elektronika zajišťující regulaci teploty a zvolen vhodný kompresor pro chlazení kabeláže a přenos tepelné energie z topného tělesa na DPS. Celé zařízení bylo podrobeno měření, které mělo pozitivní výsledky. Rovněž bylo testováno pracovníky firmy Sanmina-SCI Czech Republic s.r.o., již vyhodnotili přístroj jako vyhovující. Přístroj je schopen zvýšit lokálně teplotu na DPS na požadovanou teplotu (ve velkém rozdílu teploty s porovnáním situace bez použití lokálního ohřevu), přičemž je teplotní vliv dostatečně koncentrován, aby teplotně neovlivnil zbytek desky. Tato skutečnost může opravujícímu techniku usnadnit práci a rovněž omezit potenciální vznik defektů jak tepelných, tak mechanických.

V budoucnosti by bylo vhodné zavést do zařízení digitální nastavování teploty řízeného termočlánekovou zpětnou vazbou na výstupu zařízení, dalším krokem by bylo vytvořit zařízení, jež by zkombovalo funkci lokálního spodního ohřevu a základního spodního ohřevu do jednoho kompaktního zařízení. Toto zařízení by mohlo mít veliký potenciál v opravách desek plošných spojů, neboť by využívalo skutečností zjištěných v této práci a mohlo by tedy urychlit, usnadnit a více technologicky přizpůsobit proces oprav.

LITERATURA

- [1] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. *Fyzika 1+2* VUTIUM, 2014, 1200s. ISBN 978-8-021-44123-1.
- [2] VOLF, I., JAREŠOVÁ, M., OUHRABKA, M. *Přenos tepla*. [online]. Fyzikální olympiáda České Republiky, 2008. [cit. 2016 - 10 - 5] Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/texttz.pdf>.
- [3] *The Joule heating effect*. [online] Comsol Multiphysics Cyclopedia. [cit. 2016 - 10 - 21] Dostupné z: <https://www.comsol.com/multiphysics/the-joule-heating-effect>
- [4] *Materials used for heating elements*. [online] Electrical4u.com. [cit. 2016 - 10 - 21] Dostupné z: <http://www.electrical4u.com/materials-used-for-heating-elements/>
- [5] *Součinitel teplotní vodivosti*. [online] Izolace-info. [cit. 2016 - 10 - 25] Dostupné z: http://www.isolace-info.cz/technicke-informace/fyzikalni-veliciny/?nid=9174-soucinitel-teplotni-vodivosti-fyzikalni-veliciny-u-tepelne-ochrany-budov.html#.WE7_avnhDIV
- [6] STARÝ, J., KAHLE, P., *Plošné spoje a povrchová montáž*, Vysoké učení technické v Brně, 2005, 208 stran.
- [7] *Four Methods of Preheating a PCB for Rework or Prototyping*. [online] Zephyrtronics Video. [cit. 2016 - 11 - 11] Dostupné z: <https://youtu.be/PJkx8Q8gFDE>
- [8] *The Role of preheating in electronics rework*. [online] PACE Worldwide, 2012. [cit. 2016 - 11 - 17] Dostupné z: <https://www.paceworldwide.com/sites/default/files/Pre-Heating%20In%20Rework%20-%202012.pdf>
- [9] *How to Desolder BGA, QFN, SMD and Thru-Hole Components. BGA Rework&Repair*. [online] Zephyrtronics Video. [cit. 2016 - 11 - 17] Dostupné z: <https://youtu.be/BqmlVT5zYvQ>
- [10] ADÁMEK, M., OTÁHAL, A., VALA, R. *Návod k laboratorní úloze číslo 4 předmětu BMTS*. [online] VUT FEKT, 2014. [cit. 2016 - 11 - 23] Dostupné z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/273007/mod_resource/content/2/N%C3%A1vod%20na%20laboratorn%C3%AD%20%C3%BAlohu%20%C4%8D.%204.pdf
- [11] *Kontaktní pájecí deska typ 946B* [online] Hotair.cz. [cit. 2016 - 11 - 29] Dostupné z: <http://www.hotair.cz/detail/pajeni/predehrevy/kontaktni-pajeci-deska-typ-946b.html>
- [12] *Zephyrtronics ZT-1 Airbath* [online] Jensen Tools+Supply. [cit. 2016 - 11 - 29] Dostupné z: <http://www.jensentools.com/zephyrtronics-zt-1-cls-dpu-airbath-with-digital-control-7-6-cfm-air-volume/p/417-493>
- [13] *IR předeřev AOYUE 853A++* [online] Hotair.cz. [cit. 2016 - 11 - 29] Dostupné z: <http://www.hotair.cz/detail/pajeni/predehrevy/ir-predehrev-aoyue-853a.html>
- [14] GIBBS, R. *A Guide to Infrared (IR) Rework on BGAs* [online] IConnect007. [cit. 2016 - 11 - 29] Dostupné z: <http://smt.icconnect007.com/index.php/article/43770/a-guide-to-infrared-ir-rework-on-bgas/43773/?skin=smt>
- [15] *Moisture Sensitivity Level and Popcorn Effect*. [online] Anysilicon, 2012. [cit. 2016 - 12 - 2] Dostupné z: <http://anysilicon.com/msl-and-popcorn-effect/>
- [16] *PCT-1000 Programmable Preheater*. [online] Metcal. [cit. 2016 - 12 - 3] Dostupné z: http://www.okinternational.com/Convection_Rework_System/id-PCT-1000/PCT-1000_Programmable_Preheater
- [17] *Digitální spodní předeřev Weller, 1200W, 12V*. [online] Pajeci-technika.cz. [cit. 2017 - 5 - 3] Dostupné z: https://www.pajeci-technika.cz/fotky18806/fotos/_vyr_1416weller-whp-3000_1200w.jpg

- [18] *Infračervený spodní předehřev QUICK 854 ESD*. [online] Hotair.cz [cit. 2017 - 5 - 3] Dostupné z: <https://www.hotair.cz/detail/pajeni/predehrevy/infracerveny-predehrev-quick-854-esd.html>
- [19] *PHS-2B 230 V - IR Preheater*. [online] JBCtools.com [cit. 2017 - 5 - 13] Dostupné z: <http://www.jbctools.com/phs-2b-ir-preheater-product-1137-category-13.html>
- [20] *ST 450 Convective Pre-Heater*. [online] Paceworldwide.com [cit. 2017 - 5 - 13] Dostupné z: <https://www.paceworldwide.com/products/smt-rework-systems-and-preheaters/preheaters/st-450-convective-preheater>
- [21] *Vzduchovací motorek JK-AP9500*. [online] Jkanimals.cz [cit. 2017 - 5 - 28] Dostupné z: <https://www.jkanimals.cz/cs/akvarijni-potreby/vzduchovani-pro-akvarijni-ryby/vzduchovaci-motorky/jk-animals/66-vzduchovaci-motorek-jk-ap9500-14164.html>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

V	Objem
α_V	Koeficient teplotní délkové roztažnosti
T	Teplota
Q	Teplo
m	Hmotnost
C	Tepelná kapacita
c	Měrná tepelná kapacita
t	Čas
R	Elektrický odpor
I	Elektrický proud
U	Elektrické napětí
α_R	Teplotní součinitel odporu
q_t	Teplotní spád
q_d	Teplotní gradient
d	Šířka
k	Součinitel tepelné vodivosti
S	Plocha
a	Součinitel teplotní vodivosti
ρ	Hustota
P	Výkon
σ	Stefanova-Boltzmanova konstanta
ε	Emisivita zářiče
T_g	Teplota skelného přechodu
DPS	Deska Plošných Spojů
IR	Infra-Red, infračervený
TLV	Tlustovrstvý, tlustá vrstva
PWM	Pulse Width Modulation, Pulzně šířková modulace

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1	Teoretický příklad teplotního profilu spodního předehřevu měřeného na spodní straně opravované DPS	15
Obr. 2.2	Příklad spodního předehřívacího zařízení - hotplate typu 946B, převzato z [11].	16
Obr. 2.3	Příklad spodního předehřívacího zařízení - konvekční předehřev Zephyrtronics ZT1, převzato z [12]	17
Obr. 2.4	Příklad spodního předehřívacího zařízení - IR předehřev AOYUE 853A++, převzato z [13]	18
Obr. 2.5	Porovnání homogenosti rozložení ohřevu na DPS u hotplate zařízení a infračerveným či konvekčním zařízením.....	19
Obr. 3.1	Spodní konvekční předehřev Metcal PCT-1000, převzato z [16]	20
Obr. 3.2	Upevnění termočlánků na testovací desce u keramického kondenzátoru (1 na vrchní straně desky, 2 na spodní)	21
Obr. 3.3	Rozmístění pěti termočlánků na výstupu přístroje, PCT-1000	22
Obr. 3.4	Spodní IR předehřev WELLER WHP3000 1200W, převzato z [17].....	25
Obr. 3.5	Spodní předehřev SP863DU.....	26
Obr. 3.5	Rozmístění termočlánků na obdélníkovém výstupu přístroje, SP863DU	27
Obr. 3.6	Infračervený spodní předehřev Quick 854 ESD, převzato z [18]	30
Obr. 3.7	Infračervený spodní předehřev JBC PHS-2B, převzato z [19]	31
Obr. 3.8	Konvekční spodní předehřev PACE ST450, převzato z [20].....	31
Obr. 3.9	Ukázka pracoviště firmy Sanmina-SCI Czech Republic s.r.o.....	33
Obr. 4.1	Měření teploty zatíženého manganinového plíšku	34
Obr. 4.2	Návrh všech tří šablon vrstev k vytvoření topného TLV článku	35
Obr. 4.3	Vyrobený prototyp topného tělesa	35
Obr. 4.4	Měření teploty na spodní straně DPS (jenž je pro názornou ukázkou odejmuta) ...	36
Obr. 4.5	Nákres natvarování odporového drátu.....	37
Obr. 4.5	Schéma zapojení obvodu PWM	37
Obr. 4.6	Blokové schéma přístroje lokálního spodního ohřevu DPS	38
Obr. 4.7	Vnitřní uspořádání (vlevo) a vzhled ovládací části (vpravo) přístroje lokálního spodního ohřevu DPS	38
Obr. 4.8	Topná hlavice zařízení lokálního ohřevu	39
Obr. 4.9	Měřicí pracoviště (vlevo) a rozmístění termočlánků na přířezu DPS (vpravo).....	41

SEZNAM TABULEK

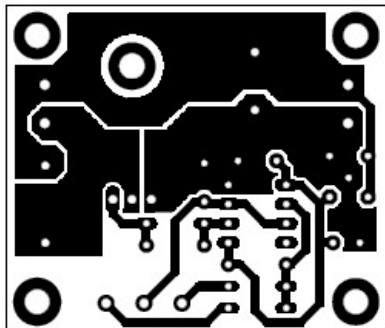
Tab. 3.1	Technické parametry konvekčního spodního předehřívacího zařízení Metcal PCT-1000 [16]	20
Tab. 3.2	Odchytky teplot nastavených od změřených na výstupu přístroje, PCT-1000	23
Tab. 3.3	Odchytky skutečné teploty výstupu od nastavené, maximální výkon, PCT-1000	23
Tab. 3.4	Požadavky firmy Sanmina-SCI Czech Republic s.r.o. na nový přístroj	24
Tab. 3.5	Technické parametry infračerveného spodního předehřívacího zařízení WELLER WHP300 1200W [17].....	25
Tab. 3.6	Technické parametry konvekčního spodního ohřevu SP863DU	26
Tab. 3.7	Rozdíl teploty zobrazené přístrojem od teploty naměřené	27
Tab. 3.8	Rozdíly naměřených hodnot od nastavených na přístroji, SP863DU	29
Tab. 3.9	Technické parametry infračerveného spodního ohřevu, Quick 854 ESD [18]	30
Tab. 3.10	Srovnání požadavků firmy Sanmina-SCI Czech republic s.r.o. se specifikacemi navržených přístrojů	32
Tab. 4.1	Parametry odporového drátu	36
Tab. 4.2	Parametry akvarijního vzduchovacího motorku Atman JKAP9500 [21]	39
Tab. 4.3	Nastavení přístrojů při srovnávání změřených teplot lokálního a základního ohřevu	40
Tab. 4.4	Srovnání dosažených teplot na jednotlivých kanálech při měření 1	42
Tab. 4.5	Srovnání dosažených teplot na jednotlivých kanálech při měření 2	44

SEZNAM GRAFŮ

Graf 3.1	Měření teploty na vrchní a spodní straně DPS u vybrané součástky, PCT-1000..	22
Graf 3.2	Měření homogenity teploty na výstupu přístroje, PCT-1000.....	23
Graf 3.3	Měření teploty na vnitřním keramickém vedení vzduchu, PCT-1000	24
Graf 3.4	Měření teploty na vrchní a spodní straně DPS u vybrané součástky, SP863DU ..	27
Graf 3.5	Měření homogenity teploty na výstupu přístroje pro teplotu $T_{\text{set}} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, SP863DU.....	28
Graf 3.6	Měření homogenity teploty na výstupu přístroje pro teplotu $T_{\text{set}} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, SP863DU.....	28
Graf 3.7	Měření homogenity teploty na výstupu přístroje pro teplotu $T_{\text{set}} = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$, SP863DU.....	29
Graf 4.1	Teplotní profil lokálního ohřevu na spodní straně přířezu DPS, maximální výkon zařízení, $h \approx 2\text{ mm}$	40
Graf 4.2	Měření teploty 1 na přířezu DPS s užitím lokálního ohřevu	41
Graf 4.3	Měření teploty 1 na přířezu DPS bez užití lokálního ohřevu	42
Graf 4.4	Měření teploty 2 na přířezu DPS s užitím lokálního ohřevu	43
Graf 4.5	Měření teploty 2 na přířezu DPS bez užití lokálního ohřevu	43

A NÁVRH OBVODU PWM

A.1 Deska plošného spoje - strana top



Rozměry desky 43×50 [mm], měřítko 1:1

A.2 Seznam součástek

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	100n	C050-024X044	Keramický kondenzátor
C3	100n FOIL	C050-030X075	Foliový kondenzátor
C4	470u/16V	E3,5-8	Elektrolytický kondenzátor
C5	100n	C050-024X044	Keramický kondenzátor
C6	4700/25	E7,5-16	Elektrolytický kondenzátor
C7	10n MKP 400V	C102-054X133	Foliový kondenzátor
D1	1N4148	DO35-7	Usměrňovací dioda
D2	1N4148	DO35-7	Usměrňovací dioda
D3	1N4148	DO35-7	Usměrňovací dioda
IO1	555	DIL8	Časovač
IO2	78L12	TO-92	Stabilizátor napětí
K1	CZM_5/2	CZM_5/2	Šroubový konektor
K2	CZM_5/2	CZM_5/2	Šroubový konektor
Q1	IRLZ44Z	TO220BH	MOSFET
R1	1k	0204/7	Rezistor
R2	50k	3RP/1610N	Potenciometr
R3	68R	0204/7	Rezistor